



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen physikalischer oder technischer Größen von Flüssigkeiten, einschließlich hochviskoser, teigiger oder pastöser Medien, unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems (Sender-Meßstrecke-Empfänger) mit wenigstens einer von einer Festkörperoberfläche gebildeten Meßstrecke, die mit dem zu vermessenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbar ist. Darüber hinaus wird eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens beschrieben.

Konventionelle Methoden zur Viskositätsmessung erfordern in der Regel die Entnahme einer Probenmenge, die in einer separaten Meßvorrichtung getestet wird. Gebräuchlich sind insbesondere Rotationsviskosimeter und Kugelfallviskosimeter sowie Kapillarviskosimeter, die das Schergefälle in der Flüssigkeit aufgrund der Relativbewegung von wenigstens einer Festkörperoberfläche zur Flüssigkeit ausnutzen. Von Nachteil bei diesen Methoden ist jedoch, daß sie sich nicht in einen technischen Verfahrensprozeß integrieren lassen, so daß große Aufwendungen für eine korrekte Messung betrieben werden müssen. Messungen an Produkten, deren Eigenschaften einer schnellen zeitlichen Veränderung unterliegen oder deren Eigenschaften leicht durch die Probenentnahme oder den Probentransport gestört werden können, sind besonders schwierig und oft mit Fehlern behaftet.

Ein Viskositätssensor, der sich für Online-Messungen eignet, wird in EP 0 527 176 B1 beschrieben. Er besteht aus einem zylindrischen Grundkörper piezoelektrischen Materials, der mit einer Wechselspannungsquelle in Verbindung steht und zu Torsionsschwingungen im Ultraschallbereich (20 ... 100 kHz) angeregt wird. Die Schwingungseigenschaften (z. B. Frequenz) des Grundkörpers werden von der angrenzenden Flüssigkeit verändert und in entsprechend veränderte elektrische Signale gewandelt. Durch Auswertung dieser Signale kann auf die Viskosität geschlossen werden. Diese technische Lösung stellt jedoch hohe Anforderungen an das Material des Grundkörpers und erfordert große Aufwendungen bei der Herstellung geeigneter Materialien und der geometrischen Gestaltung des Grundkörpers.

Darüber hinaus sind aus der wissenschaftlichen und Patentliteratur verschiedene akustische Verfahren und Vorrichtungen bekannt, die sich unter Verwendung von Oberflächenwellen zur Messung physikalischer und/oder technischer Größen von Flüssigkeiten eignen. Ihnen ist gemeinsam, daß sie im allgemeinen auf spezielle Materialien (zumeist piezoelektrisches Material, bei dem Sender, Meßstrecke und Empfänger ein einheitliches körperliches Gebilde darstellen) für das Substrat der Meßstrecke eingeschränkt und/oder auf definierte geometrische Bedingungen (dünne Platten) für die Sensorfläche angewiesen sind. Daraus ergeben sich Nachteile für die Anpassungsfähigkeit der vorgeschlagenen Lösungen hinsichtlich ihrer Anpaßbarkeit an gegebene technische Bedingung (z. B. Temperatur, Aggressivität des zu messenden Mediums, konstruktive Parameter, Material der Übertragungsstrecke u. a.)

Durch J. Kondoh, K. Saito, S. Shiokawa, H. Suzuki; Multichannel Shear-Horizontal Surface Acoustic Wave Microsensor for Liquid Characterization; 1995 IEEE Ultrasonics Symposium, pp 445 449; ist die Verwendung von Scher-Oberflächenwellen (SH-SAW  $\Rightarrow$  SHEAR HORIZONTAL SURFACE ACOUSTIC WAVE) zur Ermittlung von Stoffeigenschaften in Flüssigkeiten bekannt. Es handelt sich hierbei um eine spezielle Art von Oberflächenwellen, die sich durch Teilchenauslenkungen allein parallel zur wellenführenden Festkörperoberfläche und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung auszeichnet. D. h., es treten keine Auslenkungs-komponenten der Teilchen senkrecht zur Oberfläche

auf. Auch dieser Wellentyp erfordert den Einsatz eines piezoelektrischen Materials (z. B.  $\text{LiTaO}_3$ ), wobei die wellenführende Festkörperoberfläche von einem speziellen Kristallschnitt gebildet werden muß.

R. M. White; Silicon Based Ultrasonic Microsensors and Mikropumps; Integrated Ferroelectrics, 1995, vol. 7, pp. 353-358; beschreibt eine Methode zur Messung der Viskosität unter Verwendung von Plattenschwingungen einer nur wenige Mikrometer dünnen Membran auf Siliziumbasis. Derartige Membranstrukturen sind jedoch insbesondere gegenüber mechanischen Belastungen sehr empfindlich. Plattenschwingungen zeichnen sich zum einen durch Teilchenbewegungen parallel zur Oberfläche in Ausbreitungsrichtung und zum anderen durch Teilchenbewegungen senkrecht zur Oberfläche aus. Für die Viskositätsmessung ist jedoch nur die erste der genannten Teilchenbewegungen nutzbar.

Aus JP 09145692 A ist ein Wassertropfensensor für Windschutzscheiben und Seitenspiegel von Kraftfahrzeugen oder dergleichen bekannt. Er besteht im wesentlichen aus einem Oberflächenwellen erzeugenden Element (Sender) und einem dazu beabstandeten, auf der Oberfläche des zu überwachenden Körpers angeordneten Oberflächenwellen empfangenden Element (Empfänger). Sobald Wassertropfen in den Ausbreitungsbereich der Oberflächenwellen zwischen Sender und Empfänger gelangen kommt es zur Streuung der Oberflächenwellen und zur Absorption eines Teils der Wellenenergie. Mittels eines elektronischen Schaltkreises kann eine Auswertung der Dämpfung des Signals vorgenommen werden. Dadurch soll es möglich sein, einen Scheibenwischer in Abhängigkeit der auf einer Windschutzscheibe befindlichen Wassermenge zu steuern.

Der beschriebene Tropfensensor kann im wesentlichen nur als Schalter eingesetzt werden, der aufgrund der Erkennung der Anwesenheit oder Abwesenheit von Wasser vorge-sehene Reaktionen auslöst bzw. nicht auslöst. Wegen der Eigenschaft von Oberflächenwellen, in angrenzende Flüssigkeiten auszukoppeln, muß das Meßergebnis – also der Grad der Dämpfung des Signals – im hohen Maße von der Verteilung des Wasser auf der sensierten Oberfläche abhängen. Deshalb ist bei einer ruhenden Oberfläche, bei der die Tropfen unter Belassung von Ausbreitungspfaden für die Oberflächenwellen lokale Wasseransammlungen bilden, mit einer geringeren Dämpfung zu rechnen, als bei einer bewegten Oberfläche mit der gleichen Wassermenge, bei der die Tropfen zu einer mehr oder weniger gleichmäßigen Schicht verteilt werden. Sollten die auf die Wassertropfen wirkenden dynamischen Kräfte so groß sein, daß sich auf der Oberfläche nur eine Flüssigkeitsschichtdicke aufbauen kann, die kleiner als ein Viertel der Wellenlänge der Kompressionswelle in der Flüssigkeit ist, dann würde der gewünschte Dämpfungseffekt ausbleiben.

Wie gezeigt werden konnte, ist das Meßsignal des Tropfensensors als ein Summenwert aufzufassen, der eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Wechselwirkungen bei seinem Zustandekommen nicht erlaubt. Erst recht sind quantitative Rückschlüsse auf konkrete physikalische oder technische Größen, wie z. B. die Viskosität von Flüssigkeiten, unmöglich. Andererseits muß bei einer vergleichsweise starken, volumenreichen Beaufschlagung der Meßstrecke mit Wasser damit gerechnet werden, daß die eingesetzte Wellenenergie permanent nahezu vollständig ausgekoppelt wird, so daß ein quantitativ auswertbares Meßsignal nicht zur Verfügung steht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Messen physikalischer oder technischer Größen von Flüssigkeiten, einschließlich hochviskoser, teigiger oder pastöser Medien, zu entwickeln, das unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems mit

wenigstens einer von einer Festkörperoberfläche gebildeten Meßstrecke in einfacher Weise an unterschiedlichste Bedingungen konkreter technischer Anwendungsfälle anpaßbar ist. Dies soll insbesondere durch eine Vielfalt von einsetzbaren Substratmaterialien für die Meßstrecke, eine im wesentlichen freie Gestaltbarkeit der geometrischen Parameter des Übertragungssystems und die Möglichkeit unterschiedlicher Anregungsmechanismen zur Erzeugung akustischer Wellen erreicht werden.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch die Merkmale der Patentansprüche 1, 18, 24 und 53 gelöst. Die abhängigen Patentansprüche geben Varianten der Erfindung an.

Demnach wird zumindest ein Teil der in der Meßstrecke übertragenden akustischen Energie in Form von Rayleighwellen zur Verfügung gestellt, wobei sich die Rayleighwelle auf einer Meßstrecke aus nichtpiezoelektrischem Material über wenigstens  $\lambda/8$ , vorzugsweise jedoch mehr als  $2\lambda$  ausbreitet. Zumindest ein zur Messung ausreichender Teil der nach dem Durchgang der Rayleighwelle durch eine oder mehrere Meßstrecken in der Meßvorrichtung verbliebene Wellenenergie wird nach dem Prinzip eines Wellenleiters zum Empfänger geleitet, wobei der wellenleitende Charakter zumindest am Anfang der ersten Meßstrecke (falls die Vorrichtung mehrere Meßstrecken aufweist) beginnt und bis zum Empfänger erhalten bleibt. D. h., die Meßstrecke und der Übertragungsweg zwischen Meßstrecke und Empfänger muß wellenleitenden Charakter aufweisen. Dieses schließt sowohl die möglichst verlustarme Weiterleitung des in der Meßstrecke gewonnenen Nutzsymbols als auch die Abschirmung vor unerwünschten Störeinflüssen ein. Die Beeinflussung des Nutzsymbols durch die wellenleitenden Eigenschaften des akustischen Übertragungssystems sollten vorzugsweise bekannt, idealerweise optimiert sein.

Erfindungsgemäß wird der wellenleitende Charakter zumindest zwischen dem Beginn der Meßstrecke und dem Empfänger vorgesehen, da sonst durch die Auskopplung von Energie durch die Vertikalkomponente in die angrenzende Flüssigkeit auch die durch die Wechselwirkung der Rayleighwelle mit der Flüssigkeit gewonnene Information über die zu messenden Größen der Flüssigkeit verlorengeht und deshalb nicht mehr einer Auswertung zugeführt werden kann. Zur Ermittlung der zu messenden Größe werden ausschließlich Veränderungen wenigstens einer Kenngröße der Rayleighwelle herangezogen, wobei vorzugsweise der dissipative Energieverlust der Rayleighwelle in der Meßstrecke zugrunde gelegt wird. Wesentliche Ausführungsarten akustischer Übertragungssysteme mit wellenleitendem Charakter werden unten näher erläutert.

Die zur Durchführung des Verfahrens entwickelte Vorrichtung weist wenigstens eine solche, mit dem zu messenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbare Meßstrecke auf, die wenigstens auf einer Länge, die  $\lambda/8$  der erzeugten Rayleighwelle entspricht, zur Ausbildung und Fortleitung von Rayleighwellen geeignet ist. Darüber hinaus ist das akustische Übertragungssystem wenigstens zwischen dem Beginn der Meßstrecke und dem Empfänger der Wellenenergie nach dem Prinzip eines Wellenleiters ausgebildet.

Durch die ausschließliche Verwendung von Rayleighwellen für den Meßeffect ist die Wellenführung von der Formstabilität des Trägermaterials weitgehend unabhängig; der größte Teil der Festkörper ist in der Lage, Rayleighwellen an seiner Oberfläche fortzuleiten und somit grundsätzlich als Meßstrecke bzw. als akustisches Übertragungsmedium zwischen Sender und Empfänger zu dienen. Da der größte Teil der Wellenenergie in der Grenzschicht (Eindringtiefe: ca.  $\lambda$ ) zwischen der Festkörperoberfläche und der angrenzenden Flüssigkeit transportiert wird und die Rayleighwelle eine

Scherkomponente der Bewegung der Oberfläche besitzt, eignet sich eine entsprechend gestaltete Meßstrecke besonders gut zur Viskositätsmessung mit einem günstigen Signal-/Rausch-Verhältnis.

Im strengen physikalischen Sinne können Rayleighwellen nur auf unbegrenzten, ebenen Oberflächen eines Festkörpers auftreten, was jedoch für technische Anwendungen ohne Bedeutung sein muß. Ihre spezifischen Merkmale treten dennoch unter diesen eingeschränkten Bedingungen auf, so daß sie durchaus für meßtechnische Zwecke nutzbar sind. Rayleighwellen im Sinne der Erfindung sollen auch solche "gestörten" Rayleighwellen umfassen, die aufgrund der Begrenzungen der Wellenauflage durch geometrische Strukturen oder Grenzflächen von Materialien unterschiedlicher akustischer Eigenschaften, oder der Nähe zum Sender, in dessen Nahfeld eine noch nicht vollständig ausgebildete Rayleighwelle vorliegt, oder dergleichen von der "ideal" ausgebildeten Rayleighwelle abweichen.

Außerdem läßt sich die Periodendauer der Rayleighwelle durch die konstruktive Gestaltung des Übertragungssystems und die Wahl eines geeigneten Materials für die Meßstrecke so festlegen, daß die Periodendauer größer als die Relaxationszeit der zu messenden Flüssigkeit ist. Zur Viskositätsmessung sollte die Periodendauer möglichst nahe der Relaxationszeit liegen, was sich positiv auf die Meßgenauigkeit auswirkt.

Bei der Auswahl dieser Materialien kann zur Anpassung an den konkreten Anwendungsfall sogar an die Herstellung in ihrer Zusammensetzung diesbezüglich optimierter Legierungen oder die Veränderung der elastischen Eigenschaften der zur Fortleitung der Rayleighwelle vorgesehenen Schicht durch Bestrahlung mit strukturelle Veränderungen erzeugender Strahlung, insbesondere Kern- oder Teilchenstrahlung (z. B. Neutronen), Laserbehandlung, Ionenimplantation oder Gasimplantation (z. B. Hydrierung) gedacht werden. Bei derart maßgenauer Anpassung der wellenleitenden Körper können geringste Veränderungen des zu messenden Mediums, z. B. dessen Zusammensetzung, zum Umkippen des Ein- bzw. Auskoppelverhaltens der Wellenenergie führen und für entsprechende Schlußfolgerungen ausgenutzt werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß man unter Anwendung des sogenannten Schmelz-Spinnverfahrens bei nahezu jeder beliebigen Legierung herstellen kann. Der Grundgedanke des Verfahrens besteht darin, den Zustand einer Schmelze durch Schockabkühlung quasi einzufrieren. Die geschieht im allgemeinen dadurch, daß man einen dünnen Strahl flüssiger Schmelze auf eine rotierende, gekühlte Trommel laufen läßt, so daß bei Abkühlungsgeschwindigkeiten von etwa 1 Mio Kelvin pro Sekunde amorphe Bänder bis zu einer Dicke von ca. 0,1 Millimeter entstehen. Jedoch können die so erzeugten Materialien nur unterhalb ihrer Rekristallisationstemperatur eingesetzt werden.

Grundsätzlich ist die Erfindung zur Ermittlung all jener physikalischen und/oder technischen Größen eines flüssigen Mediums anwendbar, die die Eigenschaften der Ausbreitung von Rayleighwellen beeinflussen. Die auswertbaren Parameter sind also die Frequenz, die Phasengeschwindigkeit und die Amplitude der Rayleighwellen sowie die damit direkt zusammenhängenden Größen des Mediums, wie z. B. die Viskosität oder die Dichte. Es können aber auch Phasenübergänge, wie sie bei der Betauung, Vereisung, bei Siedeprozessen, Kavitation oder Auskristallisation auftreten, detektiert werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten werden bei der Bewertung von inhomogenen Flüssigkeiten oder als Benetzungssensor oder als Kavitationssensor gesehen. Beispielsweise können Informationen über den Zustand innerer Strukturen von inhomogenen Flüssigkeiten gewonnen wer-

den. Dabei wird vorteilhaft die Eigenschaft der Rayleighwelle genutzt, sowohl Scherkomponenten als auch Vertikalkomponenten der Bewegung in der Grenzschicht zu besitzen.

Obwohl es unmöglich ist, sämtliche in Frage kommenden Anwendungsgebiete der Erfindung erschöpfend zu benennen, sei noch darauf hingewiesen, daß sich die Erfindung auch in Systeme zur Prozeßsteuerung und -überwachung einbinden läßt. Dies gilt auch für die Überwachung des Zustandes und des Alterungsprozesses von elektrochemischen Aggregaten, wie z. B. Brennstoffzellen, Elektrolyseuren und Batterien. In der Chemie und Biotechnologie könnten Entnahmeverrichtungen für Stoffproben umgehend Informationen über die Stoffeigenschaften liefern.

Die Vielfalt des einsetzbaren Substratmaterials schafft nicht nur eine gute Anpaßbarkeit an gegebene thermische, chemische, elektrische, optische und/oder mechanische Bedingungen; die guten Ausbreitungsbedingungen von Rayleighwellen ermöglichen in vielen Fällen, daß die Grenzflächen einer vorhandenen Vorrichtung, z. B. einer Arbeitsvorrichtung oder einer massiven Wandung, als Träger für die Rayleighwelle genutzt werden. Vorteilhaft kommt in diesem Zusammenhang zum Tragen, daß Sender und Empfänger bei Bedarf von der Meßstrecke bzw. von dem die Meßstrecke tragenden Körper entfernt oder wieder daran angeschlossen werden können.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung besteht in der einfachen Möglichkeit der räumlichen Trennung von Sender und Empfänger einerseits und der Meßstrecke (Meßort) des Systems andererseits, so daß beispielsweise Sender und Empfänger nicht in den aggressiven Bereich des zu messenden Mediums gebracht werden müssen. Zwischen dem Sender/Empfänger und dem Meßort kann eine vergleichsweise große Entfernung überbrückt werden. Auch die gute Übertragbarkeit der Rayleighwellen von einem Träger auf einen anderen Träger durch Vermittlung über ein inkompressibles Koppelmedium (z. B. eine Flüssigkeit) kann vorteilhaft zur Überbrückung von Distanzen ausgenutzt werden.

Zur Erzeugung und zum Nachweis von Rayleighwellen können sehr unterschiedliche Mechanismen eingesetzt werden, was die Anpassungsfähigkeit der Erfindung weiter erhöht. Folgende Effekte sind nutzbar:

- mechanisch/akustische Anregung
- Modenkonversion
- piezoelektrischer Effekt
- magnetischer, insbesondere magnetostruktiver Effekt (Da es sich bei den voranstehenden Effekten um reversible Prozeße handelt, können diese zum Senden und Empfangen genutzt werden.)
- thermische Anregung durch gepulstes Heizen, z. B. mit einem LASER (Effekt kann nur zum Anregen einer Welle genutzt werden.)
- optische Effekte, einschließlich magneto- und elektrooptische Effekte
- piezoresistiver Effekt (Die beiden zuletztgenannten Effekte können nur zum Nachweis einer Welle genutzt werden.)

Mittel zur Modenkonversion können sowohl zwischen Sender und Meßort (Meßstrecke) als auch zwischen Meßort und Empfänger eingesetzt werden. Dies ist regelmäßig dann von Vorteil, wenn zwischen dem Meßort und Sender bzw. Empfänger eine akustische Übertragungsstrecke vorgesehen werden muß, die nicht oder nur unter Schwierigkeiten zur Fortleitung von Rayleighwellen hergerichtet werden kann. D. h., daß beispielsweise eine von einem Sender ausgehende Kompressionswelle zu Beginn der Meßstrecke durch Kon-

versionsmittel (das sind geeignete Veränderungen der Oberflächenstruktur, z. B. Kerben) in eine Rayleighwelle konvertiert wird. Diese Methode ist besonders vorteilhaft für eine Hindurchleitung von Wellenenergie durch massive Wände (Rohrleitungen, Behälterwandungen) einsetzbar.

Um den wellenleitenden Charakter der erfindungsgemäßen Vorrichtung sicherzustellen, stehen wenigstens drei prinzipielle Gestaltungsvarianten und deren Untervarianten zur Verfügung. Sie gewährleisten, daß die Auskopplung von akustischer Energie aus der Rayleighwelle in die angrenzende Flüssigkeit unterdrückt bzw. die ausgekoppelte Energie wieder weitestgehend vollständig "eingefangen" und dem Empfänger zugeführt wird:

#### Variante 1: Dünne Flüssigkeitsschicht ( $d < \lambda_{KW}/4$ )

- angrenzendes Medium mit verschiedenartiger akustischer Impedanz
- angrenzendes Medium mit gleicher akustischer Impedanz und  $v_{RW}^{(1)} < v_{RW}^{(2)}$

Falls das an die Flüssigkeitsschicht angrenzende Medium (das der Meßstrecke gegenüberliegt) eine sehr schlechte akustische Ankoppelbarkeit aufweist (wie z. B. Vakuum, Gase oder Schäume), woraus ein geringer Transmissionsgrad und ein hoher Reflexionsgrad an dieser zweiten Grenzfläche resultieren, wird die Auskopplung von Energie in Form von Kompressionswellen vermieden, wenn die Dicke  $d$  der Flüssigkeitsschicht dünner ist, als die Flüssigkeitsschicht, die zur Ausbildung der Grundschiwingung einer stehenden Welle darin notwendig ist. Bei einer Schichtdicke unterhalb  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle ist diese Bedingung regelmäßig erfüllt.

Wenn die Schichtdicke der Flüssigkeit durch einen angrenzenden Festkörper begrenzt wird, muß zusätzlich die Bedingung der Totalreflexion für die (Flüssigkeits-)Kompressionswelle erfüllt sein und das die Flüssigkeitsschicht begrenzende Gegenmaterial (angrenzendes Medium<sup>(2)</sup>) muß eine höhere Geschwindigkeit  $v_{RW}^{(2)}$  für die Rayleighwelle als das Material der Meßstrecke<sup>(1)</sup> aufweisen (wie z. B. Glas gegenüber Stahl, Aluminium).

#### Variante 2: Gegenüberliegende Festkörpergrenzflächen mit akustischer Ankopplung, vorzugsweise wenn $d > \lambda_{KW}/4$ sein soll

- $v_{RW}^{(1)} = v_{RW}^{(2)}$  wenn gegenseitige Anregung von Rayleighwellen auf parallelen Festkörpergrenzflächen vorgesehen ist
- $v_{RW}^{(1)} \neq v_{RW}^{(2)}$ , wenn die gegenüberliegenden Festkörper nicht parallel verlaufen, aber deren Neigung den unterschiedlichen Rayleighwellengeschwindigkeiten angepaßt ist
- $v_{RW}^{(1)} > v_{RW}^{(2)}$ , wenn der gegenüberliegende Festkörper eine Volumenschallwelle weiterleiten soll

Die Auskopplung der Energie der Rayleighwelle aus der mit dem Sender verbundenen ersten Festkörpergrenzfläche<sup>(1)</sup> in eine Flüssigkeitsschicht mit einer Dicke  $d$ , die größer als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle sein darf, wird genutzt, um an einer parallel gegenüberliegenden zweiten Festkörpergrenzfläche<sup>(2)</sup>, die eine Wellenlaufstrecke mit gleicher Rayleighwellengeschwindigkeit bildet, die Wellenenergie wieder zu Rayleighwellen einzukoppeln. Dazu müssen die Schallgeschwindigkeiten  $v_{RW}^{(1)}$  und  $v_{RW}^{(2)}$  der ersten Festkörpergrenzfläche<sup>(1)</sup> und der parallel gegenüberliegenden zweiten Festkörpergrenzfläche<sup>(2)</sup> gleich groß sein. Von den auf der zweiten Festkörpergrenzfläche<sup>(2)</sup> induzierten

ten Rayleighwelle wird wiederum eine Kompressionswelle ausgekoppelt, die ihrerseits auf der gegenüberliegenden ersten Festkörpergrenzfläche<sup>(1)</sup> erneut eine Rayleighwelle erzeugt. In Abhängigkeit der Dimensionierung der Meßstrecke kann der Prozeß der gegenseitigen Wellenanregung unterschiedlich intensiv ausgeprägt sein. Zur Messung der Wellenenergie kann an der ersten und/oder der zweiten Festkörpergrenzfläche ein Empfänger vorgesehen werden. Der gleiche Effekt kann bei unterschiedlichen Rayleighwellengeschwindigkeiten mit angepaßter Neigung der Grenzflächen erzielt werden.

Wenn die Schallgeschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)}$  der ersten Festkörpergrenzfläche<sup>(1)</sup> jedoch größer als die Schallgeschwindigkeit  $v_{RW}^{(2)}$  der parallel gegenüberliegenden Festkörpergrenzfläche<sup>(2)</sup> ist, wird in den gegenüberliegenden Festkörper eine Volumenschallwelle eingekoppelt, die in einen mit diesem Festkörper verbundenen Empfänger geleitet wird.

Es ist jedoch auch möglich, die von der Rayleighwelle der ersten Festkörpergrenzfläche unter bestimmten Winkel ausgekoppelte Kompressionswelle direkt von einem Empfänger zu detektieren und für die Bewertung der Flüssigkeit heranzuziehen. Der Winkel ist bestimmt durch die Geschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)}$  der Rayleighwelle in der Meßstrecke und der Schallgeschwindigkeit  $v_{KW}$  der Kompressionswelle in der Flüssigkeit.

Variante 3: Substratmaterial mit langsamer Rayleighwellengeschwindigkeit ( $v_{RW}^{(1)} < v_{KW}$ )

Besitzt das Substratmaterial der Meßstrecke<sup>(1)</sup> eine Geschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)}$  für die Rayleighwelle, die unter der Schallgeschwindigkeit  $v_{KW}$  der angrenzenden Flüssigkeit<sup>(1)</sup> liegt, so kann keine Auskopplung von Energie stattfinden, die nicht dem meßtechnischen Zweck dient. In Bezug auf die meisten Flüssigkeiten (Wasser, viele Öle) sind als mögliche Substratmaterialien beispielsweise Kunststoffe, weiche Metalle (z. B. Gold, Blei, Wismut), sowie Graphit zu nennen.

Es ist auch denkbar, Elemente mit akusto-optischen Eigenschaften einzusetzen, um den wellenleitenden Charakter des akustischen Übertragungssystems günstig zu beeinflussen.

Sofern nicht nur Informationen über die zu messende Flüssigkeit benötigt werden, sondern auch eine Beeinflussung der Eigenschaften der Flüssigkeit erwünscht ist – z. B. zum Zwecke der Regelung komplexer verfahrenstechnischer Anlagen oder der direkten Einflußnahme auf stoffwandelnde Prozesse – kann es von Vorteil sein, daß über die Festkörpergrenzfläche der Meßstrecke zusätzlich zur akustischen Energie Energie anderer Art in die angrenzende Flüssigkeitsschicht eingekoppelt wird. Dies geschieht über eine die Grenzfläche der Meßstrecke bildende Schicht oder über den die Meßstrecke tragenden Festkörper. Die Schicht bzw. der Festkörper können beispielsweise elektrisch leitfähig ausgebildet und mit einer Gleich- oder Wechselspannungsquelle verbunden sein. Wenn die an die Meßstrecke angrenzende Flüssigkeit eine polare oder eine elektroreologische und/oder eine Flüssigkeit mit Ionen dissoziierten Bestandteilen ist, kommt es in einem elektrischen Spannungsfeld zu den jeweils typischen Wechselwirkungen. D. h., die Moleküle polarer Flüssigkeiten richten sich im Spannungsfeld entsprechend aus, Ionen migrieren zur entgegengesetzt geladenen Elektrode und werden bei ausreichend hoher Spannung dort entladen, elektroreologische Flüssigkeiten verändern ihre Viskosität.

Es ist aber auch möglich, eine die Grenzfläche der Meßstrecke bildende Schicht oder den die Meßstrecke tragenden Festkörper mit einer Wärmequelle zu verbinden, um die an-

grenzende Flüssigkeitsschicht zu beheizen. Falls diese Schicht oder eine in der Nähe der Grenzfläche angeordnete Schicht elektrisch leitend ist, kann durch einen Anschluß an eine elektrische Spannungsquelle die Schicht nach dem Prinzip einer Widerstandsheizung betrieben werden.

Sofern Bestandteile der Flüssigkeit photoptische Reaktionen zeigen, ist eine Einflußnahme durch Einkopplung von Lichtquanten geeignet. Dazu empfiehlt es sich, die Grenzfläche der Meßstrecke bildende Schicht oder der die Meßstrecke tragende Festkörper optisch durchlässig auszubilden und mit einer Lichtquanten erzeugenden Energiequelle, z. B. einer LASER-Quelle, zu verbinden.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der dargestellten Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a Schematische Darstellung eines akustischen Übertragungssystems mit ausgeprägten Systemgrenzen und einer für Rayleighwellen durchgängigen Wellenleiterstrecke zwischen Sender und Empfänger;

Fig. 1b Schematische Darstellung eines akustischen Übertragungssystems mit einem Sender für Volumenschallwellen und einem am Beginn der Meßstrecke angeordneten Modenwandler zur Konvertierung von Volumenschallwellen in Rayleighwellen;

Fig. 1c Schematische Darstellung eines akustischen Übertragungssystems mit Sender und Empfänger für Volumenschallwellen und mit jeweils am Beginn und am Ende der Meßstrecke angeordneten Modenwandlern zur Konvertierung von Volumenschallwellen in Rayleighwellen und umgekehrt;

Fig. 1d Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht, deren Dicke von einem der Meßstrecke gegenüberliegenden Festkörper begrenzt wird;

Fig. 1e Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht, deren Dicke durch die Schwerkraft (schiefe Ebene) oder die Zentrifugalkraft begrenzt wird;

Fig. 1f Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht, deren Dicke durch einen Abstreifer begrenzt wird;

Fig. 1g Prinzipdarstellung einer Mischvorrichtung mit Rührbalken, die gleichzeitig als Abstreifer fungieren, um die Schichtdicke der Flüssigkeit für den periodischen Meßvorgang auf den maximal zulässigen Betrag zu begrenzen (gemäß dem Abstreiferprinzip von Fig. 1f);

Fig. 1h Schnittdarstellung der Mischvorrichtung von Fig. 1g;

Fig. 1i Prinzipdarstellung einer Walzeinrichtung mit einem mit der Walze rotierenden akustischen Übertragungssystem;

Fig. 1j Prinzipdarstellung einer Walzeinrichtung mit einem akustischen Übertragungssystem, dessen Meßstrecke von der Oberfläche der Walze gebildet wird, die sich jedoch quasistationär verhält;

Fig. 1k Schematische Darstellung eines akustischen Übertragungssystems mit keilförmigen Koppellementen zur Erzeugung von Rayleighwellen mittels einfacher Dikenschwinger, die auf einer ablaufenden Flüssigkeitsschicht aufliegen bzw. aufschwimmen;

Fig. 1l Prinzipdarstellung eines Strömungskanals während des Sendemodus mit einer gepulst arbeitenden Meßvorrichtung, deren Meßstrecke von einem Modenwandler und einem Reflektor begrenzt ist, und mit einem der Meßstrecke gegenüberliegenden, die Schichtdicke der Flüssigkeit begrenzenden Festkörper;

Fig. 1m wie Fig. 1l, jedoch im Empfangsmodus;

Fig. 2-1 Schematische Darstellung des akustischen Über-



tragungssystems für eine Meßvorrichtung mit parallel gegenüberliegenden Festkörpergrenzflächen mit gleichen Rayleighwellengeschwindigkeiten;

Fig. 2-2 Prinzipdarstellung einer sich relativ zu ihrem Gehäuse bewegendem Schnecke, die die Flüssigkeit transportiert. Das Vorbeigleiten der Schneckenschulter gegenüber der Meßstrecke ermöglicht kurzzeitig eine akustische Kopplung.

Fig. 2-3 Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit gegenüberliegenden, nicht-parallelen Festkörpergrenzflächen deren Neigung den unterschiedlichen Rayleighwellengeschwindigkeiten angepaßt ist;

Fig. 2-4 Prinzipdarstellung eines Gleitlagers mit einem akustischen Übertragungssystem, dessen Meßstrecke vom Lagersitz und der parallel gegenüberliegenden Grenzfläche der gelagerten Welle gebildet wird. Die Meßstrecke ist längs zur Wellenachse angeordnet;

Fig. 2-5 Prinzipdarstellung eines in einem Zylinder gleitenden Kolbens mit einem akustischen Übertragungssystem, dessen Meßstrecke von einem Teil der Zylinderwand und der gegenüberliegenden parallelen Grenzfläche des vorbeigleitenden Kolbens gebildet wird;

Fig. 2-6 Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einer der ersten Festkörpergrenzfläche gegenüberliegenden Festkörpergrenzfläche mit geringerer Rayleighwellengeschwindigkeit, die das Einkoppeln von Volumenschallwellen ermöglicht und mit Empfängern für Volumenschallwellen in Verbindung steht;

Fig. 2-7 Prinzipdarstellung eines Rohrstücks mit einem akustischen Übertragungssystem, das Rayleighwellen auf der die Meßstrecke tragenden Innenseite einer Rohrwandung erzeugt und die in der das Rohr ausfüllenden Flüssigkeit entstehenden Kompressionswellen auf der gegenüberliegenden Rohrwand in einen angrenzenden Festkörper zu Volumenschallwellen konvertiert werden;

Fig. 2-8 Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einer der ersten Festkörpergrenzfläche gegenüberliegenden Festkörpergrenzfläche, die von einem Empfänger für die sich in der Flüssigkeit ausbreitenden Kompressionswellen gebildet wird;

Fig. 2-9 Prinzipdarstellung eines Rohrstücks mit einem akustischen Übertragungssystem, das Rayleighwellen auf der die Meßstrecke darstellenden Innenseite einer Rohrwandung erzeugt und die in der das Rohr ausfüllenden Flüssigkeit entstehenden Kompressionswellen direkt in einen Empfänger für Kompressionswellen führt;

Fig. 3-1 Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung mit einem Substratmaterial, dessen Schallgeschwindigkeit für Rayleighwellen geringer ist als die Schallgeschwindigkeit der angrenzenden Flüssigkeit;

Fig. 3-2 Prinzipdarstellung einer Meßvorrichtung mit großer räumlicher Trennung des Ortes von Sender und Empfänger und des Ortes der Meßstrecke;

Fig. 3-3 Prinzipdarstellung einer Meßvorrichtung, die das Messen in einem abgeschlossenen, die Flüssigkeit enthaltenden Behälter erlaubt, wobei alle zur Erzeugung und Empfang der Rayleighwelle notwendigen Teile außerhalb des Behälters liegen;

Fig. 3-4 Prinzipdarstellung einer Meßvorrichtung aus zwei Meßstrecken unter Verwendung eines einstückigen, die Rayleighwellen führenden Festkörpers zum Vergleich der Eigenschaften einer einen Reaktor durchströmenden Flüssigkeit. Dabei wird das Prinzip von Fig. 3-3 benutzt;

Fig. 3-5 Prinzipdarstellung eines Rohrstücks mit einer

den Rohrquerschnitt nicht verringernden Meßvorrichtung;

Fig. 3-6 Prinzipdarstellung eines Querschnitts durch einen Behälter mit einer Meßvorrichtung, die die Behälterwandung als Rayleighwellen führenden Festkörper benutzt;

Fig. 4-1 Prinzipdarstellung einer Meßstrecke im elektrischen Feld;

Fig. 4-2 Prinzipdarstellung einer Meßstrecke im elektrischen Feld mit mehreren zugeordneten, separat ansteuerbaren Elektroden;

Fig. 4-3 Prinzipdarstellung einer Meßstrecke mit elektrischer Widerstandsheizung;

Fig. 4-4 Prinzipdarstellung einer Meßstrecke mit einem Dickenschwinger zur Einleitung mechanischer Energie;

Fig. 4-5 Prinzipdarstellung einer membranartigen Meßstrecke mit angeschlossenem mechanischen Element;

Fig. 4-6 Prinzipdarstellung einer Meßvorrichtung mit Temperaturregelung über Viskositätsmessung;

Fig. 4-7 Kombination einer Meßstrecke mit einem Peltier-Element;

Fig. 4-8 Schematische Darstellung des akustischen Übertragungssystems für eine Meßvorrichtung auf einem transparenten Trägermaterial, wobei zusätzlich optische Energie in die Meßstrecke eingebracht wird.

Fig. 4-9 Prinzipdarstellung einer Kombination von akustischer Meß- und optischer Beobachtungsvorrichtung zur gleichzeitigen Messung und Beobachtung der Veränderung von Flüssigkeitseigenschaften;

Fig. 5.1 Schematische Darstellung von Vorrichtungen mit mehreren Meßstrecken

- a) hintereinander angeordnete Meßstrecken
- b) parallel angeordnete Meßstrecken mit mehreren Empfängern
- c) parallel angeordnete Meßstrecken mit einem einzigen Empfänger;

Fig. 5.2

- a) Ausführungsbeispiel einer Anordnung von Meßstrecken aus Fig. 5.1b
- b) Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Anordnung zur Bestimmung einer physikalischen Kenngröße eines Schmierfilms in einem Gleitlager;

Fig. 5.3 Schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anordnung mit parallel angeordneten Meßstrecken unter Ausnutzung der Modenkonzersion im Wellenleiter

Fig. 5.4 Ausführungsbeispiel der Anordnung aus Fig. 5.3

Fig. 5.5 Beispiele für Wellenleiter, auf denen Rayleighwellen zwischen Sender und Empfänger reflektiert werden

- a) Reflexion der Rayleighwellen an den Außenkanten des Wellenleiters
- b) Reflexion von Rayleighwellen an in einen Festkörper eingebrachte Nuten
- c) Schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer kompakten Sender- und Empfängeranordnung;

Durch die Fig. 1a bis 1c soll noch einmal verdeutlicht werden, was gemäß dieser Erfindung unter dem wellenleitenden Charakter des akustischen Übertragungssystems verstanden wird. Diese Beispiele können nur stellvertretend für die Vielzahl möglicher Kombinationen bzw. Anordnung der zur akustischen Übertragungsstrecke gehörenden Elemente (Sender, Empfänger, Meßstrecke und ggf. Zuleitungsstrecke, Ableitungsstrecke, Modenwandler, Abschirmung)

stehen.

Die schematische Darstellung von Fig. 1a zeigt eine Meßstrecke 100, die einerseits über einer Zuleitungsstrecke 110 mit einem Sender  $S_{RW}$  für Rayleighwellen und andererseits über eine Ableitungsstrecke 120 mit einem Empfänger  $E_{RW}$  in Verbindung steht. Die Meßstrecke 100 ist damit von Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  räumlich entkoppelt. Sofern für die Zu- und Ableitungsstrecken 110, 120 ein anderes als das die Meßstrecke 100 tragendes Material gewählt wurde, besteht auch eine materialseitige Entkopplung. Die hat den Vorteil, daß die Meßstrecke 100 optimal an die konkreten Bedingungen des jeweiligen Einsatzfalls angepaßt werden kann; ein Bindung an spezielle, zur Erzeugung von Rayleighwellen geeignete Materialien besteht nicht. Gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel werden vom Sender  $S_{RW}$  möglichst ausschließlich Rayleighwellen auf der angrenzenden Zuleitungsstrecke 110 erzeugt und (dem Beginn) der Meßstrecke 100 zur Verfügung gestellt. Die Meßstrecke 100 steht mit einer zu messenden (nicht dargestellten) Flüssigkeit in Verbindung und nimmt – in Abhängigkeit ihrer stofflichen Eigenschaften – von den die Meßstrecke 100 durchquerenden Rayleighwellen einen gewissen Energiebetrag auf. Die so veränderte Rayleighwelle wird über die Ableitungsstrecke 120 zum Empfänger  $E_{RW}$  geleitet und dort sensiert. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, daß die Zu- und Ableitungsstrecke 110, 120 während des Meßvorgangs nicht mit Medien in Kontakt treten kann, die gute akustische Kopplungseigenschaften aufweisen und deshalb zur Auskopplung von Wellenenergie führen würden.

Der durchgängig einheitliche, Rayleighwellen leitende körperliche Aufbau dieses Ausführungsbeispiels schafft in sich relativ starke Systemgrenzen, die ausgeprägte wellenleitende Eigenschaften des gesamten akustischen Übertragungssystems 5 bewirken. D. h., die vom Sender  $S_{RW}$  erzeugte Wellenenergie wird weitestgehend innerhalb der Systemgrenzen gehalten und von äußeren Störungen abgeschirmt. Ein zumindest zur Messung ausreichender Teil der nach dem Durchgang der Rayleighwelle durch die Meßstrecke 100 verbliebene Wellenenergie wird zum Empfänger  $E_{RW}$  geleitet, wobei der wellenleitende Charakter zumindest am Anfang der Meßstrecke 100 beginnt und bis zum Empfänger  $E_{RW}$  erhalten bleibt. Dieses schließt sowohl die möglichst verlustarme Weiterleitung des in der Meßstrecke 100 gewonnenen Nutzsignals als auch die Abschirmung vor unerwünschten Störeinflüssen ein. Zur Ermittlung der zu messenden Größe werden ausschließlich Veränderungen wenigstens einer Kenngröße der Rayleighwelle herangezogen, wobei vorzugsweise der dissipative Energieverlust der Rayleighwelle in der Meßstrecke als Basis für die Bewertung dienen sollte.

Ein weiteres wesentliches Merkmal des wellenleitenden Charakters im Bereich der Meßstrecke besteht darin, entweder eine Auskopplung von Energie durch die Vertikalkomponente der Rayleighwelle in die angrenzende Flüssigkeit (infolge der Erzeugung von Kompressionswellen) zu verhindern oder die ausgekoppelte Energie weitestgehend innerhalb des akustischen Übertragungssystems zu halten und an den  $E_{RW}$  weiterzuleiten. Zumindest aber sollten die Bedingungen bekannt und konstant sein, denen die ausgekoppelte Energie unterworfen ist.

Die Auskopplung von Kompressionswellen in die Flüssigkeit kann durch die oben beschriebenen Varianten 1 und 3 erfolgen, nämlich durch die Begrenzung der Schichtdicke der zu messenden Flüssigkeit auf maximal  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle und – falls ein Festkörper an die Flüssigkeitsschicht grenzt – muß dessen Rayleighwellengeschwindigkeit zur Erfüllung der Bedingung der Totalreflexion grö-

ßer als die Rayleighwellengeschwindigkeit der Meßstrecke 100 sein, oder durch die Verwendung eines Materials für die Meßstrecke, dessen Rayleighwellengeschwindigkeit kleiner als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle in der Flüssigkeit ist. Falls jedoch die voranstehenden Bedingungen nicht erfüllt werden können und eine Flüssigkeitsschicht mit einer Dicke größer als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle akzeptiert werden muß, so kann durch die oben beschriebene Variante 2 sichergestellt werden, daß die durch die Wechselwirkung der Rayleighwelle mit der Flüssigkeit gewonnene Information über die zu messenden Größen der Flüssigkeit nicht verlorenggeht und im Nutzsignal des Empfängers enthalten ist. Zum einen kann dies erreicht werden durch die Verwendung eines geeigneten, im Abstand zur Meßstrecke angeordneten Festkörpers, der die von der Meßstrecke ausgehende, in der Flüssigkeit erzeugte Kompressionswelle wieder auffängt und an seiner Oberfläche zu einer Rayleighwelle wandelt. Wenn die Ausbreitungsstrecke für die Rayleighwelle auf dem gegenüberliegenden Festkörper ausreichend groß ist, wird auch von diesem eine Kompressionswelle erzeugt werden, die wiederum von der gegenüberliegenden Meßstrecke 100 aufgefangen werden wird. Die Rayleighwellen leitende Grenzschicht des zweiten Festkörpers wirkt also analog der Meßstrecke 100 auf die angrenzende Flüssigkeit ein und erbringt damit einen Anteil am Meßeffect. Eine weitere Möglichkeit zur Gewährleistung der erfindungsgemäßen Wellenleiterprinzipien besteht darin, die von der Meßstrecke 100 ausgehende Kompressionswelle direkt von einem geeigneten Empfänger oder unter Zwischenschaltung eines Festkörpers, der mit einem Empfänger in Verbindung steht, zu erfassen. Die Beeinflussung des Nutzsignals durch die wellenleitenden Eigenschaften des akustischen Übertragungssystems sollten vorzugsweise bekannt, idealerweise optimiert sein.

Um einen hinreichenden Meßeffect erzielen zu können, muß sich die Rayleighwelle auf der Meßstrecke 100 über wenigstens  $\lambda/8$ , vorzugsweise jedoch mehr als  $2\lambda$  ausbreiten können.

Das akustische Übertragungssystem von Fig. 1b unterscheidet sich von dem der Fig. 1a durch einen Sender  $S_{VW}$  für Volumenschallwellen, der in alle Richtungen gleichmäßig Schallwellen aussendet. Ein Teil dieser Volumenschallwellen trifft auf den am Beginn der Meßstrecke 100 angeordneten Modenwandler 4, wo die Volumenschallwellen in Rayleighwellen konvertiert werden. Die Energieübertragung zwischen dem Sender  $S_{VW}$  und dem Modenwandler 4 kann über einen Festkörper oder über eine Flüssigkeit erfolgen. Für die Bewertbarkeit des Meßeffects sind konstante Bedingungen im Bereich der Zuleitungsstrecke 111 erforderlich. Zwischen dem Modenwandler 4 und dem Empfänger  $E_{RW}$  herrschen die schon im Zusammenhang mit Fig. 1a beschriebenen Bedingungen mit Wellenleitcharakter 130.

Die schematische Darstellung von Fig. 1c zeigt ein akustisches Übertragungssystem 5 mit Sender  $S_{VW}$  und Empfänger  $E_{VW}$  für Volumenschallwellen und jeweils am Beginn und am Ende der Meßstrecke 100 angeordneten Modenwandlern 4, 4' zur Konvertierung von Volumenschallwellen in Rayleighwellen und umgekehrt. Somit transportiert nur noch die Meßstrecke 100 Rayleighwellen. Zusätzlich wurden trichterförmig vom Empfänger ausgehende Grenzen 131 gesetzt, die den Wellenleitcharakter des Bereichs 130 hinreichend sicherstellen sollen. Sie gewährleisten, daß ein ausreichender Teil der vom Modenwandler 4' in Richtung des Empfängers  $E_{VW}$  ausgehenden Energie der Volumenschallwelle detektierbar und daß der Einfluß von Störquellen 60 hinreichend gering gehalten wird.

Die nachfolgenden Ausführungsbeispiele der Fig. 1d bis 1m beschreiben in stilisierter Form Möglichkeiten der Nut-

zung der Erfindungsvariante 1, wonach durch Begrenzung der Schichtdicke der zu messenden Flüssigkeit auf maximal  $\lambda/4$  der Kompressionswelle ein Auskoppeln von Kompressionswellen verhindert werden soll.

So zeigt Fig. 1d einen Festkörper 1a, dessen Enden einen  $S_{RW}$  bzw. einen  $E_{RW}$  für Rayleighwellen  $RW$  tragen, die sich in einer an der Oberfläche 10 liegenden Grenzfläche 11 ausbreiten. Seitliche Begrenzungselemente 2b kanalisieren den Strom einer Flüssigkeitsschicht 3a und definieren dadurch die Ausdehnung der Meßstrecke 100, an die sich rechts und links die Zuführungsstrecke 110 bzw. die Abführungsstrecke 120 anschließen. Die Dicke  $d$  der Flüssigkeitsschicht 3a wird durch einen der Meßstrecke 100 gegenüberliegenden Festkörper 2b begrenzt. Er besitzt eine Rayleighwellengeschwindigkeit, die über der der Meßstrecke 100 liegt, so daß die Bedingung der Totalreflexion gegeben ist. An die Oberfläche 10 des Festkörpers 1a im Bereich von Zu- und Ableitungsstrecke 110, 120 grenzt ein Medium 2a mit einer schlechten akustischen Ankoppelbarkeit, z. B. Luft. Die Begrenzungselemente 2b sind derart ausgebildet, daß sie den Durchgang der Rayleighwelle im wesentlichen nicht behindern, damit die durch die Wechselwirkung mit der Flüssigkeit der Rayleighwelle aufgeprägte Information möglichst nicht verfälscht bzw. abgeschwächt wird. Wenn die zu messende Flüssigkeit 3a nicht unter Druck steht, können die Begrenzungselemente 2b auch weggelassen werden; die Kapillarkwirkung würde die Flüssigkeit sicher im Spalt zwischen den beiden Festkörpern halten.

Für Flüssigkeiten mit hinreichend niedriger Viskosität kann auch eine schiefe Ebene die Dicke  $d$  der Flüssigkeitsschicht 3a begrenzen, wie dies in Fig. 1e angedeutet ist. Die Meßstrecke 101 erstreckt sich an der Oberfläche des geneigten Festkörpers 1b zwischen dem Sender  $S_{RW}$  und dem Empfänger  $E_{RW}$ , ohne daß eine Zuleitungs- oder Ableitungsstrecke für die Rayleighwellen  $RW$  zwischengeschaltet ist. Eine Abwandlung dieses Prinzips liegt in der Ausnutzung von Zentrifugalkäften, wobei der Festkörper 1b um die Rotationsachse 140 rotiert. Gegenüber der Nutzung schwerkraftorientierter Meßvorrichtungen können durch das Zentrifugalprinzip sehr viel höhere Kräfte erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Begrenzung der Schichtdicke  $d$  der Flüssigkeitsschicht 3a liegt in der Anwendung von Abstreifern 150 (siehe Fig. 1f), die periodisch die Meßstrecke des akustischen Übertragungssystems überstreichen und dabei für die notwendige Reduzierung der Schichtdicke  $d$  auf kleiner  $\lambda_{KW}/4$  sorgen. Ein technisches Anwendungsbeispiel hierfür kann unter anderem eine Mischvorrichtung (Fig. 1g und 1h) mit einer kreisscheibenförmigen Basis (Festkörper 1d) und dazu drehbar gelagerten Rührbalken (Abstreifer 151) sein, wobei die Abstreifer 151 zur Oberfläche des Festkörpers 1d, in dem Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  eingelassen sind, einen schmalen Spalt bildet. Die Zuführung des Mediums auf die Mischebene kann durch die Hohlachse 151a erfolgen. Je nach den Anforderungen und Bedingungen des Einzelfalls können Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  radial (mit Meßstrecke 103) ausgerichtet oder in Umfangsrichtung (mit Meßstrecke 102) angeordnet werden. Während im zuerstgenannten Fall Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  gleichzeitig vom Abstreifer überstrichen werden, geschieht dies im zweitgenannten Fall zeitlich nacheinander.

Fig. 1i zeigt zwei zueinander beabstandete Walzen 1e, 1ee, die durch den gebildeten Spalt ein pastöses oder teigiges Medium 3 fördern und zu einem flächigen Gebilde formen, das durch einen Abstreifer 61 von der Oberfläche der Walze 1e abgehoben wird. In diese Oberfläche sind in Umfangsrichtung Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  eingelassen. Die zwischen ihnen liegende Grenzschicht bildet die Meß-

strecke 104. Sie gelangt mit jeder Umdrehung einmal in Bereich des ausgeformten flächigen Gebildes 3a und kann so periodisch zur Ausführung eines Meßzyklus eingesetzt werden. Die Schichtdicke  $d$  des Gebildes 3a liegt wieder unter  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle im Medium 3.

Die Vorrichtung der Fig. 1j unterscheidet sich von der vorangehend beschriebenen dadurch, daß sie nicht mobile, sondern stationäre Sender  $S_{VW}$  und  $E_{VW}$  verwendet. Sie sind in akustischen Koppellementen eingebettet, die mit der Oberfläche der Trommel 1f in (schleifender) Verbindung stehen. Vom Sender  $S_{VW}$  (z. B. einem Dickenschwinger) werden Volumenschallwellen im akustischen Koppellement 71 angeregt, die wiederum in der Grenzschicht der Walze 1f gerichtet laufende Rayleighwelle erzeugen. Diese breiten sich bis zum akustischen Koppellement 70 des Empfängers  $E_{VW}$  aus, wo sie in Volumenschallwellen gewandelt und vom Empfänger  $E_{VW}$  sensiert werden. Die Meßstrecke erstreckt sich vom Spalt zwischen den Walzen 1f, 1ff bis zur Auflagestelle des akustischen Koppellements 70.

Eine der Fig. 1e ähnliche Variante mit einer von einem Festkörper 1g gebildeten geneigten Ebene zeigt Fig. 1k. Jedoch erfolgt hier die Einkopplung der akustischen Energie von der freien, an das akustisch schlecht ankoppelbare Medium 2a angrenzenden Flüssigkeitsoberfläche her. Dazu werden zwei Keilwandler 72, 73 verwendet, deren Keilwinkel genau an die zu erzeugende Rayleighwelle angepaßt sind. Sie tragen auf der der Wellenaufrichtung entgegengesetzten Seite Dickenschwinger, die als Sender  $S_{VW}$  bzw. Empfänger  $E_{VW}$  dienen. Die im Keilwandler 72 vom Dickenschwinger erzeugten Volumenschallwellen führen zu Kompressionswellen in der Flüssigkeitsschicht 3a, die wiederum aufgrund ihres Auftreffwinkels auf der Festkörperoberfläche Rayleighwellen  $RW$  anregen. Wenn die Rayleighwellen den Bereich des anderen Keilwandlers 73 erreichen, konvertieren sie wieder zu Kompressionswellen. Die dadurch im Keilwandler 73 angeregten Volumenwellen werden vom Empfänger  $E_{VW}$  sensiert.

Das Anwendungsbeispiel der Fig. 1l und 1m betrifft eine Meßanordnung zur Ermittlung der Viskosität eines im Kanal 62 strömenden Mediums 3, kurz vor seinem Austritt aus einer Düse. Zur Begrenzung der Schichtdicke der zu messenden Flüssigkeit 3a wird ein Festkörper 2b verwendet, dessen Rayleighwellengeschwindigkeit größer als die der gegenüberliegenden Meßstrecke 106 ist. Damit besteht eine enge Verwandtschaft zu der in Fig. 1a schematisch dargestellten Meßanordnung. Der die Meßstrecke 106 tragende Festkörper 1h besitzt auf der einen Seite eine sich verjüngende äußere Kontur, die mit einer schmalen Stirnfläche abschließt. Daran ist eine Sender-/Empfänger-Einheit  $S_{VW}/E_{VW}$ , zum Senden und Empfangen von Volumenschallwellen angeschlossen, die periodisch im Sendemodus (Fig. 1l) und Empfangsmodus (Fig. 1m) betrieben wird. Auf der gegenüberliegenden Seite ist ein Modenwandler 4 angeordnet, an dem die Volumenschallwellen zu Rayleighwellen konvertiert werden. Diese breiten sich entlang der Meßstrecke 106 aus und werden bei Erreichen des Reflektors 40 reflektiert, so daß sie die Meßstrecke ein zweites Mal durchlaufen. Am Modenwandler 4 wird dann die mit der zur Flüssigkeitsschicht gehörenden Meßinformation "beladene" Rayleighwelle wieder in eine Volumenschallwelle konvertiert, die in Richtung auf der Sender-/Empfänger-Einheit zurückläuft.

Die nachfolgenden Ausführungsbeispiele der Fig. 2-1 bis 2-9 beschreiben in stilisierter Form Möglichkeiten der Nutzung der Erfindungsvariante 2, wonach die von dem ersten wellenführenden Festkörper in die angrenzende Flüssigkeit ausgekoppelte Kompressionswelle in einen gegenüberlie-



genden Festkörper wieder eingekoppelt wird. Durch dieses "Einfangen" der Auskopplung unterliegt die Dicke der Flüssigkeitsschicht über der Meßstrecke keiner oberen Begrenzung und kann insbesondere dicker als  $\frac{1}{4}$  der Wellenlänge der Kompressionswelle  $\lambda_{KW}$  in der Flüssigkeit sein. Diese Erfindungsvariante 2 besitzt drei Untervarianten wobei die ersten beiden darin bestehen, die Kompressionswelle auf einer gegenüberliegenden Festkörperoberfläche, die bei gleichen Rayleighwellengeschwindigkeiten parallel zur ersten liegt, oder die eine den unterschiedlichen Geschwindigkeiten angepaßte gegenseitige Neigung aufweisen, wieder zu Rayleighwellen einzukoppeln. Die dritte Untervariante besteht darin, die Kompressionswelle in einen gegenüberliegenden Festkörper, der mit Empfängern in Verbindung steht oder selbst ein Empfänger für Kompressionswellen ist, einzukoppeln.

So zeigt Fig. 2-1 ein akustisches Übertragungssystem 5 aus einem Festkörper 1 und einem gegenüber liegenden Festkörper 2c, wobei die beiden Festkörper 1 und 2c gleiche Rayleighwellengeschwindigkeiten  $v_{RW}^{(1)} = v_{RW}^{(2)}$  besitzen und die Oberflächen der beiden Festkörper 1 und 2c parallel liegen. Festkörper 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und an seinem anderen Ende einen Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$ . In der Grenzschicht 11 breitet sich die Rayleighwelle RW aus. Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3b begrenzt und so die Meßstrecke 100 definiert, an die sich links und rechts die Zuleitungsstrecke 110 und die Ableitungsstrecke 120 anschließen. Die Dicke d der Flüssigkeitsschicht 3b muß dicker als die viskose Grenzschicht der Flüssigkeit sein und unterliegt keiner weiteren Bedingung. Die Festkörpergrenzflächen im Bereich der Zu- und Ableitungsstrecken 110, 120, 220 grenzen an ein Medium 2a mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit (z. B. Luft oder andere Gase). Die Begrenzungselemente 25 sind so ausgebildet, daß sie den Durchgang der Rayleighwelle im wesentlichen nicht behindern, damit die durch die Wechselwirkung mit der Flüssigkeit der Rayleighwelle aufgeprägte Information möglichst nicht verfälscht bzw. abgeschwächt wird. Auf der Oberfläche des dem Festkörper 1 gegenüberliegenden Festkörpers 2c werden durch die Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit, die von der sich dadurch abschwächenden Rayleighwelle RW in 11 angeregt sind, Rayleighwellen RW angeregt, die sich in der Grenzschicht 21 ausbreiten. Die Rayleighwellen RW in 21 regen, sich dadurch abschwächend, ihrerseits Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit an, die erneut Rayleighwellen RW in 11 anregen. Dadurch entsteht ein Mechanismus der wechselseitigen Anregung von Rayleighwellen RW in den gegenüberliegenden Festkörpergrenzflächen 11, 21, vermittelt durch die Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit. Durch den die Flüssigkeit 3b berührenden Teil der Oberfläche von 2c und die seitlichen Begrenzungen 25 wird eine weitere Meßstrecke 200 definiert, an die sich rechts die Ableitungsstrecke 220 hin zu einem weiteren Empfänger  $E'_{RW}$  anschließt. Die dargestellte Meßvorrichtung ist auch dann funktionstüchtig, falls nur einer der beiden, an den Ableitungsstrecken 120 bzw. 220 angeschlossenen Empfängern  $E_{RW}$ ,  $E'_{RW}$  zum Einsatz kommt.

Fig. 2-2 zeigt die schematische Darstellung des Spaltes zwischen einer sich in ihrem Gehäuse 1 bewegenden Schnecke mit der Schneckenschulter 2 und diesem Gehäuse 1. 1 und 2 besitzen die gleiche Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)} = v_{RW}^{(2)}$ . Durch einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  werden auf 1 Rayleighwellen RW erzeugt, die sich auf der Oberfläche von 1 ausbreiten und so die Meßstrecke 100 definieren. Dabei regen sie in der angrenzenden Flüssigkeit 3 Kompressionswellen KW an. Zu, bei gleichförmiger Be-

wegung der Schnecke, periodisch wiederkehrenden Zeitpunkten steht die Schneckenschulter 2 in der dargestellten Weise der Meßstrecke 100 zwischen Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  parallel gegenüber und ermöglicht so die Anregung von Rayleighwellen RW durch Kompressionswellen KW auf der Schneckenschulter 2. Diese auf der Oberfläche von 2 sich ausbreitenden Rayleighwellen definieren dadurch eine weitere Meßstrecke 200 und erzeugen wiederum Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit, die ihrerseits Rayleighwellen auf dem Gehäuse 1 anregen. Letztere gelangen, bei geeigneter Dimensionierung, in den Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$ . Der Vorteil der skizzierten Vorrichtung besteht in der Nutzung vorhandener Bauteile als Träger der Rayleighwellen. Der Weg der akustischen Übertragung vom Sender  $S_{RW}$  über Rayleighwellen RW auf dem Gehäuse 1, Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit, Rayleighwellen RW auf der Schneckenschulter 2, wiederum Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit und erneut Rayleighwellen RW auf dem Gehäuse 1, die schließlich in den Empfänger  $E_{RW}$  gelangen, ermöglicht eine Signalübertragung von Sender zu Empfänger, die auf direktem Weg über Rayleighwellen RW auf dem Gehäuse 1 nicht möglich wäre, entweder weil deren Entfernung zu groß ist und die Abstrahlung von Kompressionswellen die Rayleighwellen zu stark schwächen würde, oder weil eine direkte Übertragung von Sender  $S_{RW}$  zu Empfänger  $E_{RW}$  durch eine Unterbrechung 7 der Laufstrecke, z. B. durch einen Einlaß, unmöglich ist.

Fig. 2-3 zeigt ein akustisches Übertragungssystem 5 aus einem Festkörper 1 und einem gegenüber liegenden Festkörper 2d, wobei die beiden Festkörper 1 und 2d unterschiedliche Rayleighwellengeschwindigkeiten  $v_{RW}^{(1)} \neq v_{RW}^{(2)}$  besitzen, so daß ein Anregen von Rayleighwellen RW in der Grenzschicht 21 von 2d durch die Kompressionswellen KW, die ihrerseits durch Rayleighwellen RW, die sich in der Grenzschicht 11 auf dem Festkörper 1 ausbreiten, angeregt werden, durch die gegenseitige Neigung der Oberflächen der Festkörper 1 und 2d zueinander unter dem Neigungswinkel  $\phi$  erreicht wird. Der Festkörper 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und an seinem anderen Ende einen Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$ . Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3b begrenzt und so die Meßstrecke 100 definiert, an die sich links und rechts die Zuleitungsstrecke 110 und die Ableitungsstrecke 120 anschließen. Durch den die Flüssigkeit 3b berührenden Teil der Oberfläche von 2d und die seitlichen Begrenzungen 25 wird eine weitere Meßstrecke 200 definiert, an die sich rechts die Ableitungsstrecke 220 hin zum Empfänger  $E'_{RW}$  anschließt. Die Dicke d der Flüssigkeitsschicht 36 muß dicker als die viskose Grenzschicht der Flüssigkeit sein und unterliegt keiner weiteren Bedingung. Die Festkörpergrenzflächen im Bereich der Zu- und Ableitungsstrecken 110, 120, 220 grenzen an ein Medium 2a mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit (z. B. Luft oder andere Gase). Die Begrenzungselemente 25 sind so ausgebildet, daß sie den Durchgang der Rayleighwelle im wesentlichen nicht behindern, damit die durch die Wechselwirkung mit der Flüssigkeit der Rayleighwelle aufgeprägte Information möglichst nicht verfälscht bzw. abgeschwächt wird. Wie schon zu Fig. 2-1 beschrieben, bleibt die Meßvorrichtung auch dann funktionstüchtig, falls nur einer der beiden Empfänger  $E_{RW}$  oder  $E'_{RW}$ , die auf den Festkörpern 1 bzw. 2d sitzen, zum Einsatz kommt.

Fig. 2-4 zeigt die schematische Darstellung eines Gleitlagers in dem sich eine Welle 2 befindet. Ein Teil des Lagersitzes 25 ist als die Meßstrecke tragender Festkörper 1 ausgebildet. 1 trägt sowohl Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für Rayleighwellen RW, die sich auf der Oberfläche von 1 ent-

lang der Verbindungsstrecke zwischen Sender und Empfänger ausbreiten, wodurch die Meßstrecke 100 definiert wird. Die zu messende Flüssigkeit 3 befindet sich im Lagerspalt zwischen dem die Meßstrecke 100 tragenden Festkörper 1 und der Welle 2. Die sich entlang der Meßstrecke 100 ausbreitende Rayleighwelle bewirkt die Anregung einer (nicht dargestellten) Kompressionswelle in der Flüssigkeit 3, diese wiederum regt eine weitere Rayleighwelle an, die sich auf der Welle 2, die parallel zu 1 liegt und die gleiche Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)} = v_{RW}^{(2)}$  besitzt, ausbreitet, wodurch eine der Meßstrecke 100 gegenüberliegende weitere Meßstrecke 200 entsteht. Die Rayleighwelle auf der Welle 2 regt ihrerseits Kompressionswellen in der Flüssigkeit 3 an, die erneut Rayleighwellen RW auf 1 anregen. Die Vorrichtung von Fig. 2-4 ermöglicht die Messung von Flüssigkeitseigenschaften direkt im Lagerspalt eines Gleitlagers unter Verwendung der Oberflächen von vorhandenen Bauteilen als Träger von Rayleighwellen.

Anstelle eines Gleitlagers für eine rotierende Welle zeigt Fig. 2-5 die schematische Darstellung eines Gleitlagers für einen vor und zurückgleitenden Kolben 2. Ein Teil des den Kolben 2 führenden Zylinders 25 ist als die Meßstrecke tragender Festkörper 1 ausgebildet. 1 trägt sowohl Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für Rayleighwellen RW, die sich auf der Oberfläche von 1 entlang der Verbindungsstrecke zwischen Sender und Empfänger ausbreiten, wodurch die Meßstrecke 100 definiert wird. Die zu messende Flüssigkeit 3 befindet sich im Lagerspalt zwischen 1 und dem Kolben 2. Die sich auf dem Festkörper 1 ausbreitende Rayleighwelle bewirkt die Anregung einer (nicht dargestellten) Kompressionswelle in der Flüssigkeit 3, diese wiederum regt eine weitere Rayleighwelle an, die sich auf dem Kolben 2, der parallel zu 1 liegt und die gleiche Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)} = v_{RW}^{(2)}$  besitzt, ausbreitet, wodurch eine der Meßstrecke 100 gegenüberliegende weitere Meßstrecke 200 entsteht. Die Rayleighwelle auf dem Kolben 2 regt ihrerseits Kompressionswellen in 3 an, die erneut Rayleighwellen RW auf 1 anregen. Ebenso wie die Vorrichtung von Fig. 2-4 ermöglicht die Vorrichtung von Fig. 2-5 die Messung von Flüssigkeitseigenschaften direkt im Gleitpalt unter Verwendung der Oberflächen von vorhandenen Bauteilen als Träger von Rayleighwellen.

Fig. 2-6 zeigt ein akustisches Übertragungssystem 5 aus einem Festkörper 1 und einem gegenüber liegenden Festkörper 2e, der eine geringere Geschwindigkeit  $v_{RW}^{(2)}$  für die Rayleighwelle besitzt als die Rayleighwellengeschwindigkeit des Festkörpers 1  $v_{RW}^{(1)}$ . Dieser Festkörper 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$ . In der Grenzschicht 11 breitet sich die Rayleighwelle RW aus. Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3b begrenzt und so die Meßstrecke 100 definiert, an die sich links die Zuleitungsstrecke 110 anschließt. Die Dicke d der Flüssigkeitsschicht 3b muß dicker als die viskose Grenzschicht der Flüssigkeit sein und unterliegt keiner weiteren Bedingung. Die Festkörpergrenzfläche im Bereich der Zuleitungsstrecke 110 grenzt an ein Medium 2a mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit (z. B. Luft oder andere Gase). Die Begrenzungselemente 25 sind so gestaltet, daß sie einen guten Durchtritt für die Rayleighwelle RW ermöglichen. An der Oberfläche des dem Festkörper 1 gegenüberliegenden Festkörpers 2e werden durch die Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit, die von der sich dadurch abschwächenden Rayleighwelle RW in der Grenzschicht 11 angeregt sind, Volumenschallwellen SW angeregt, die sich im Festkörper 2e in definierten Richtungen ausbreiten und zu Empfängern E und E', die mit dem Festkörper 2e in Verbindung stehen, gelangen.

Fig. 2-7 zeigt die schematische Darstellung eines die

Meßvorrichtung tragenden Stücks einer Rohrleitung 27 vom Durchmesser d, die die zu messende Flüssigkeit 3 enthält. Auf einem in die Rohrwand integrierten Festkörper 1 breiten sich Rayleighwellen RW aus, die von einem ebenfalls in die Rohrwand integrierten Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  angeregt werden. Die Länge der Ausbreitungsstrecke der Rayleighwellen definiert die Meßstrecke 100. Diese Rayleighwellen bewirken die Anregung von Kompressionswellen KW in der Flüssigkeit, die auf die gegenüberliegende Rohrwand treffen und dort in einem geeigneten Festkörper 2 Volumenschallwellen SW anregen, die von diesem Festkörper 2 zu einem Empfänger  $E_{SW}$  geleitet werden. Das dargestellte Stück einer Rohrleitung kann so ausgeführt werden, daß ein Einbau in bestehende Systeme möglich ist, wobei nur eine geringe Querschnittsveränderung bewirkt wird.

Die gegenüberliegende Festkörperoberfläche, auf die die sich in der Flüssigkeit ausbreitende Kompressionswelle trifft, kann direkt die Oberfläche eines Empfängers für Kompressionswellen sein. So zeigt Fig. 2-8 ein akustisches Übertragungssystem 5 aus einem Festkörper 1 und einem gegenüber liegenden Festkörper  $E_{KW}$  der ein Empfänger für Kompressionswellen ist. Dieser Festkörper 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$ . In der Grenzschicht 11 breitet sich die Rayleighwelle RW aus, deren gesamte Ausbreitungsstrecke die Meßstrecke 100 definiert, an die sich links die Zuleitungsstrecke 110 anschließt. Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3b begrenzt. Die Dicke d der Flüssigkeitsschicht 3b muß dicker als die viskose Grenzschicht der Flüssigkeit sein und unterliegt keiner weiteren Bedingung. Die Festkörpergrenzfläche im Bereich der Zuleitungsstrecke 110 grenzt an ein Medium 2a mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit (z. B. Luft oder andere Gase). Die Begrenzungselemente 25 sind so gestaltet, daß sie einen guten Durchtritt für die Rayleighwelle RW ermöglichen.

Fig. 2-9 zeigt die schematische Darstellung eines die Meßvorrichtung tragenden Stücks einer Rohrleitung 27 vom Durchmesser d, die die zu messende Flüssigkeit 3 enthält. Auf einem in die Rohrwand integrierten Festkörper 1 breiten sich Rayleighwellen RW aus, die von einem ebenfalls in die Rohrwand integrierten Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  angeregt werden. Die Länge der Ausbreitungsstrecke der Rayleighwellen definiert die Meßstrecke 100. Diese Rayleighwellen bewirken die Anregung von Kompressionswellen in der Flüssigkeit KW, die auf einen in einem an die gegenüberliegende Rohrwand angeschlossenen Rohrstutzen sitzenden Empfänger für Kompressionswellen  $E_{KW}$  treffen. Das dargestellte Stück einer Rohrleitung kann so ausgeführt werden, daß ein Einbau in bestehende Systeme möglich ist, wobei nur eine geringe Querschnittsveränderung bewirkt wird.

Die nachfolgenden Ausführungsbeispiele der Fig. 3-1 bis 3-6 beschreiben in stilisierter Form Möglichkeiten der Nutzung der Erfindungsvariante 3, wonach als wellenführende Festkörperoberfläche ein Material verwendet wird, das eine geringere Geschwindigkeit für die Ausbreitung von Rayleighwellen besitzt als die Geschwindigkeit der Kompressionswellen in der zu messenden, angrenzenden Flüssigkeit beträgt. Dadurch unterliegt die Dicke der Flüssigkeitsschicht über der Meßstrecke keiner oberen Begrenzung und kann insbesondere dicker als  $\frac{1}{4}$  der Wellenlänge der Kompressionswelle  $\lambda_{KW}$  in der Flüssigkeit sein.

So zeigt Fig. 3-1 ein akustisches Übertragungssystem 5 aus einem Festkörper 1, dessen Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_{RW}^{(1)}$  kleiner ist als die Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_{KW}$  der zu messenden Flüssigkeit 3b. 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und an seinem anderen Ende einen Empfänger für Ray-

leighwellen  $E_{RW}$ . In der Grenzschicht 11 breitet sich die Rayleighwelle  $RW$  aus. Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3b begrenzt und so die Meßstrecke 100 definiert, an die sich links und rechts die Zuleitungsstrecke 110 und die Ableitungsstrecke 120 anschließen. Die Dicke der Flüssigkeitsschicht 3b muß dicker als die viskose Grenzschicht der Flüssigkeit sein und unterliegt keiner weiteren Bedingung. Die Festkörpergrenzfläche im Bereich der Zu- und Ableitungsstrecken 110, 120 grenzt an ein Medium 2a mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit (z. B. Luft oder andere Gase). Die Begrenzungselemente 25 sind so ausgebildet, daß sie den Durchgang der Rayleighwelle im wesentlichen nicht behindern, damit die durch die Wechselwirkung mit der Flüssigkeit der Rayleighwelle aufgeprägte Information möglichst nicht verfälscht bzw. abgeschwächt wird. Dies kann beispielsweise durch Verwendung von Dichtmaterialien wie PU-Schaum oder Gummilippen erreicht werden.

Rayleighwellen besitzen die Eigenschaft, physikalisch an die Oberfläche des sie führenden Festkörpers gebunden zu sein. Diese Wellenleitung erfolgt nahezu verlustlos und ermöglicht somit räumlich ausgedehnte Festkörper als Träger der Welle. Die mögliche große räumliche Entfernung von Sender und Empfänger einerseits und Meßstrecke andererseits erlaubt Messungen an schlecht zugänglichen Orten oder an Orten bzw. in Medien an bzw. in denen Bedingungen (z. B. hohe Temperaturen, chemische Aggressivität, elektromagnetische Störungen) vorliegen, denen Sender und/oder Empfänger nicht ausgesetzt werden können. So zeigt Fig. 3-2 einen langgestreckten, lanzenförmigen Festkörper 1 mit einer Rayleighwellengeschwindigkeit kleiner als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle in der Flüssigkeit 3, dessen eine Ende Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für die Rayleighwellen  $RW$  trägt und dessen andere Ende in die zu messende Flüssigkeit 3 eintaucht. Der benetzte Teil der die Rayleighwelle  $RW$  tragenden Oberfläche des Festkörpers 1 bildet die Meßstrecke 100. Da die Veränderung der Kenngrößen der Rayleighwelle, die durch den Durchgang durch die Meßstrecke bewirkt werden von der Länge der Meßstrecke und von den Eigenschaften der Flüssigkeit 3 abhängen, kann eine Vorrichtung der dargestellten Art entweder als Füllstandssensor benutzt werden, nämlich dann, wenn die Flüssigkeit konstante Eigenschaften besitzt (oder die sich ändernden Flüssigkeitseigenschaften die Rayleighwelle nicht beeinflussen) oder, bei fester Eintauchtiefe, als Sensor zum Messen der Flüssigkeitseigenschaften (z. B. Viskosität).

Die Fig. 3-3 zeigt eine Variante der Ausgestaltung, die die Messung an einer Flüssigkeit in einem abgeschlossenen Behälter ermöglicht. In der Behälterwand 25 ist mit einer Verschraubung 26 eine Hülse 27 befestigt. Diese Hülse 27 dient als Träger für einen lanzenartigen Festkörper 1, der die Rayleighwelle führt und eine geringere Geschwindigkeit für die Rayleighwelle besitzt als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle in der Flüssigkeit. Dieser Festkörper 1 ist in der Hülse 27 mit einem Dichtmaterial 23 befestigt, das den Durchtritt der Rayleighwellen gestattet. Somit wird eine Anordnung erreicht, bei der das eine Ende des die Rayleighwelle führenden Festkörpers 1 in Kontakt mit der zu messenden Flüssigkeit 3 steht und das andere Ende einen Halter  $H$  mit Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für die Rayleighwellen trägt. Die dargestellte Formgebung des Festkörpers 1 im Bereich des formschlüssigen Halters  $H$  ermöglicht eine einfach handhabbare Ankopplung von Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  an der Festkörper 1.

In Fig. 3-4 wird eine Meßvorrichtung skizziert, die auf einem einstückigen, die Rayleighwelle führenden Festkörper 1 zwei Meßstrecken 101 und 102 besitzt. Dadurch können

mit einer Meßvorrichtung die Eigenschaften einer Flüssigkeit 3' in einer Rohrleitung 27 an zwei verschiedenen Stellen, vor und hinter einem Reaktor 61, gemessen werden. Der Festkörper 1 besitzt eine Rayleighwellengeschwindigkeit, die kleiner ist als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle in der Flüssigkeit 3'. Der Festkörper 1, der einen bidirektionalen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und einen ebenso bidirektionalen Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$  trägt, durchdringt die Wand der Rohrleitung 27 in der in Fig. 3-3 dargestellten Art. Die asymmetrische Anbringung des Sender  $S_{RW}$  bewirkt unterschiedlich lange Laufstrecken für die Rayleighwellen, die die Meßstrecke 101 bzw. die Rayleighwellen, die die Meßstrecke 102 durchlaufen, wodurch bei gepulstem Sendesignal – die Wellenpakete, die die unterschiedlich langen Wege zurückgelegt haben, zu unterschiedlichen Zeiten im Empfänger  $E_{RW}$  eintreffen und so von einem Empfänger mit zeitaufgelöster Messung aufgenommen werden können. Sind Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für Rayleighwellen symmetrisch angeordnet, so sind zur Unterscheidung der Signale der beiden Meßstrecken 101, 102 zwei getrennte Empfänger notwendig. Das gewonnene Meßsignal kann über eine Regelung 62 die Betriebsbedingungen des Reaktors 61 bestimmen.

In Fig. 3-5 wird schematisch eine Ausgestaltung gezeigt, die die Meßvorrichtung in eine, die Flüssigkeit 3' enthaltende Rohrleitung 27 integriert, ohne den Querschnitt der Rohrleitung 27 zu verringern. An das Rohr 27 sind zwei Rohrstutzen angebracht, von denen einer den Sender für die Rayleighwellen  $S_{RW}$  und der andere den Empfänger für die Rayleighwellen  $E_{RW}$  trägt.  $S_{RW}$  und  $E_{RW}$  sitzen dabei außerhalb der zu messenden Flüssigkeit 3', die durch das die Rohrstutzen abdichtenden Dichtmaterialien 23 eingeschlossen wird. Diese Dichtmaterialien 23 sind so ausgeführt, daß sie ein Durchtreten der Rayleighwelle  $RW$  ermöglichen. Der wellenführende Festkörper 1, wird entweder von der Rohrwand selbst gebildet, falls diese aus einem Material besteht, das eine geringere Geschwindigkeit für die Rayleighwelle  $v_{RW}^{(1)}$  besitzt als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle  $v_{KW}$  in der angrenzenden Flüssigkeit 3' oder von einem in die Rohrwand eingelassenen, auf die Rohrwand aufgebracht oder durch oben beschriebene, geeignete Veränderung des Materials der Rohrwand erzeugten, geeigneten Material, das sich zwischen Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  erstreckt, und die genannte Geschwindigkeitsbedingung  $v_{RW}^{(1)} < v_{KW}$ , erfüllt. Die Laufstrecke der Rayleighwelle  $RW$ , die innerhalb der beiden Dichtmaterialien 23 liegt und von der Flüssigkeit 3' benetzt ist, definiert die Meßstrecke 100. Das dargestellte Rohrstück kann mit den Flanschanschlüssen 27' in bestehende Leitungen einbaut werden.

Fig. 3-6 zeigt, daß analog zu der in Fig. 3-5 für den Fall einer geschlossenen Rohrleitung dargestellten Weise, ebenso die Wand eines vorliegenden, die zu messende Flüssigkeit 3 enthaltenden Behälters 25 als die Rayleighwelle führenden Festkörper 1 benutzt werden kann. Auf den nicht von der Flüssigkeit 3 benetzten Enden der Behälterwand sind Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  für die Rayleighwelle  $RW$  angebracht. Der Weg der Rayleighwelle auf der Behälterwand erfolgt durch die Flüssigkeit 3 hindurch, wobei durch den benetzten Teil der Laufstrecke der Rayleighwelle die Meßstrecke 100 definiert wird. Der wellenführende Festkörper 1 wird entweder von der Behälterwand selbst gebildet, falls diese aus einem Material besteht, das eine geringere Geschwindigkeit für die Rayleighwelle  $v_{RW}^{(1)}$  besitzt als die Geschwindigkeit der Kompressionswelle  $v_{KW}$  in der angrenzenden Flüssigkeit 3 oder von einem in die Behälterwand eingelassenen, auf die Behälterwand aufgebracht oder durch oben beschriebene, geeignete Veränderung des

Materials der Behälterwand erzeugten, geeigneten Material, das sich zwischen Sender  $S_{RW}$  und Empfänger  $E_{RW}$  erstreckt, und die genannte Geschwindigkeitsbedingung  $v_{RW}^{(1)} < v_{KW}$  erfüllt. Der Behälter 25 kann z. B. als Wanne, Tiegel oder als eine strömende Flüssigkeit enthaltende Rinne ausgeführt sein.

Die nachfolgend beschriebenen Fig. 4-1 bis 4-7 zeigen Ausführungsbeispiele, die zusätzlich zu der akustischen Energie eine weitere Energieform in den Bereich der Meßstrecke einkoppeln.

Nach Fig. 4-1 befindet sich die polare Flüssigkeit in einem von außen angeregten elektrischen Feld. Dadurch lagern sich entsprechend ihrer Polarität Teilchen an die Elektrode, die gleichzeitig Meßstrecke ist, an. Somit kann der Anteil selektiv angesprochener polarer Teilchen vor der Elektrode und damit innerhalb der viskosen Grenzschicht gesteuert werden. Der Vergleich des Messergebnisses der Rayleighwellenausbreitung mit und ohne elektrisches Feld läßt so z. B. eine Aussage über den Ionengehalt in einer Flüssigkeit zu.

Gemäß Fig. 4-2 ist die an der Meßstrecke befindliche Elektrode mehrfach unterbrochen, wobei jede Teilelektrode mit einem individuellen Signal angesteuert werden kann. Es sind verschiedene Betriebsmoden möglich:

- Betrieb mit Gleich- oder Wechselspannung
- unterschiedliches Gleichspannungspotential an verschiedenen Elektroden (Konzentrationsbildung von polaren Teilchen)
- alle Elektroden an gleichem Gleichspannungs-, aber unterschiedlichem Wechselspannungspotential (selektives Ansprechen verschiedener polarer Teilchen über deren charakteristische (bspw. Resonanz-) Frequenz)
- Erzeugung einer elektrischen "Wanderwelle" durch phasenverschiedene Ansteuerung ( $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$  mit  $i = 1..n$ )
- Synchronisierung dieser Wanderwelle mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle, z. B., damit die Konzentration polarer Teilchen dort maximal ist, wo die Rayleighwelle eine maximale Auslenkung der Scher- und minimale Auslenkung der Kompressionskomponente hat.

Fig. 4-3 zeigt die Zufuhr thermischer Energie, z. B. elektrisch durch eine Widerstandsheizung, um einen Temperaturgradienten innerhalb der Flüssigkeit zu erzielen. Die Temperatur der Meßstrecke  $T_{MS}$  ist höher als die der Umgebung  $T_U$ .

Damit können verschiedene Effekte erzeugt werden:

- Einwirkung auf chemische Prozesse oder Reaktionen, die durch Zufuhr thermischer Energie eine Viskositätsänderung bewirken.
- gezielte Änderung der Viskositätsverteilung (Viskositätsgradient) über die Temperatur z. B. für Anwendungen im Bereich der Verfahrenstechnik (Extruder).

Eine Möglichkeit zur Einleitung von mechanischer (akustischer) Energie in die Flüssigkeit, um z. B. (chemische) Prozesse zu beschleunigen oder z. B. eine Reinigungswirkung zu erzielen (Ultraschallreinigung), zeigt Fig. 4-4. Der "Reinigungserfolg" kann durch Veränderung der Konzentration / Zusammensetzung / Niederschlag auf der Meßstrecke festgestellt werden. Umgekehrt kann eine bewußt gewünschte Durchmischung z. B. einer Emulsion abhängig von der an der Meßstrecke festgestellten, konzentrationsabhängigen Viskosität erzeugt werden.

Die mechanische Veränderung der Gestalt der Meß-

strecke durch mechanischen Eingriff, wie sie in der Prinzipskizze von Fig. 4-5 angedeutet ist, hat Vorteile hinsichtlich:

- Eine Durchmischung der Flüssigkeit ist möglich.
- Ein Pumpeffekt ist möglich.
- Eine längere Laufstrecke der Rayleighwelle wird erzeugt (wenn  $\lambda_{MS} \gg \lambda_{RW}$ )

Mit Fig. 4-6 soll auf die Möglichkeit der Regelung der Temperatur über die Messung der Viskosität hingewiesen werden. So können z. B. temperaturabhängige Prozesse in einem Rührwerk gesteuert werden. Regelung der Temperatur über die Messung der Viskosität kann auch unter Einsatz eines Kühlelements (bspw. Peltier-Elements) erfolgen (siehe Fig. 4-7). Anwendungsmöglichkeiten werden z. B. in der Prüfung der Qualität und der Regelung eines Kühlsystems gesehen.

Bild 4-8 zeigt den schematischen Aufbau einer Meßvorrichtung auf einem transparenten Festkörper 1. Dieser Festkörper 1 trägt an seinem einen Ende einen Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und an seinem anderen Ende einen Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$ . Zwischen diesen beiden breitet sich an der Oberfläche von 1 die Rayleighwelle RW aus. Durch seitliche Begrenzungselemente 25 wird die zu messende Flüssigkeit 3 begrenzt und so die Meßstrecke 100 definiert. Die Begrenzungselemente 25 sind so ausgebildet, daß sie den Durchgang der Rayleighwelle im wesentlichen nicht behindern. Durch den transparenten Festkörper 1 fällt von unten Licht ein und bewirkt so einen zusätzlichen Energieeintrag in die Umgebung der Meßstrecke 100. Durch diese optische Anregung können Reaktionen in photoaktiven Flüssigkeiten oder in photoaktiven Festkörpern, die in der Flüssigkeit verteilt sind, ausgelöst werden. Dadurch bewirkte Veränderungen von Flüssigkeitseigenschaften können mit dem akustischen Meßsystem gemessen werden. Soll die Meßvorrichtung unter Verwendung eines nicht-transparenten Festkörpers realisiert werden, kann der Lichteinfall u. U. aus einer anderen Richtung erfolgen. Unter Benutzung von Lasern kann optische Energie in sehr schmalen Strahlenbündeln auf engem Raum konzentriert werden und damit die Meßstrecke nur teilweise mit optischer Energie versorgt werden.

Das Bild 4-9 zeigt schematisch den Aufbau einer akustischen Meßstrecke auf einem transparenten Trägermaterial zur Verwendung unter einem Mikroskop. Auf einem Objektträger 1 sitzen links ein Sender für Rayleighwellen  $S_{RW}$  und rechts ein Empfänger für Rayleighwellen  $E_{RW}$ . Die zu untersuchende Probenflüssigkeit 3 befindet sich dazwischen und wird von einem Deckglas 2 bedeckt. Diese Anordnung ermöglicht die Messung von Flüssigkeitseigenschaften, beispielsweise biologischer oder biochemischer Flüssigkeiten bzw. von Veränderung dieser Flüssigkeitseigenschaften und die gleichzeitige optische Beobachtung dieser Flüssigkeiten mit einem Mikroskop 6. Vorteilhaft kann die Vorrichtung benutzt werden, wenn durch das zur optischen Beobachtung notwendige Licht 7 als Auslöser für photochemische Prozesse in der Probenflüssigkeit 3 wirkt und die dadurch bewirkten Veränderungen von Flüssigkeitseigenschaften mit dem akustischen Übertragungssystem gemessen werden können.

In Fig. 5.1 sind erfindungsgemäße Vorrichtungen mit mehreren Meßstrecken schematisch dargestellt. In Fig. 5.1a wird die von einem Sender für Rayleighwellen S ausgehende Rayleighwelle RW über eine Zuleitungsstrecke 110 zu einer ersten Meßstrecke 100. Nach dem Durchgang durch diese Meßstrecke werden die Rayleighwellen über eine Strecke mit Wellenleitcharakter 130 auf eine zweite Meß-



strecke 101 und dieser weiter über eine Strecke mit Wellenleitcharakter auf eine dritte Meßstrecke 102. Vom Ende dieser Meßstrecke werden die Rayleighwellen über eine Ableitungsstrecke 120 dem Empfänger E zugeführt. Praktische Anwendung findet eine solche Anordnung bei der Füllstandsüberwachung von mehreren, voneinander getrennten Tanks mit identischen Flüssigkeiten. Sind die Meßstrecken identisch ausgeführt, so erhält man jeweils deutlich voneinander unterscheidbare Empfängersignale für den Fall, daß kein, ein, zwei oder drei Meßstrecken mit der Flüssigkeit in Kontakt stehen.

Eine weitere schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anordnung ist in Fig. 5.1b dargestellt. Hier werden die von einem Sender für Rayleighwellen S ausgehenden Rayleighwellen RW über eine Zuleitungsstrecke 110 auf die Meßstrecken 100, 101 und 102 geleitet und nach Durchgang durch die jeweilige Meßstrecke über Ableitungsstrecken 120, 121, 122 den Empfängern E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> zugeleitet. Praktische Anwendung findet eine solche Anordnung mit zwei Meßstrecken bei einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer ersten Meßstrecke 100, die mit dem zu messenden Medium in Kontakt bringbar ist und einer zweiten Meßstrecke 101, die als Referenzstrecke dient und mit dem Medium nicht in Kontakt bringbar ist. Eine solche Anordnung mit Referenzstrecke kommt besonders dann zur Anwendung, wenn die durch die Flüssigkeit hervorgerufene Änderung des Meßsignals im Empfänger E<sub>1</sub> klein ist gegenüber anderen Einflüssen, wie beispielsweise Signaländerungen durch Temperaturschwankungen. Sowohl in Fig. 5.1a als auch 5.1b kann die Anzahl der verwendeten Meßstrecken beliebig gewählt werden. In Fig. 5.1c ist eine Anordnung schematisch dargestellt, bei der von einem Sender S ausgehende Rayleighwellen über Zuleitungsstrecken 110 und 111 den Meßstrecken 100 und 101 zugeführt werden und von diesen über Ableitungsstrecken 120 und 121 auf einen einzigen Empfänger E geleitet werden. Werden die Meßstrecken 100 und 101 gleichartig ausgeführt und unterscheidet sich die Rayleighwellen-Laufzeit auf der Strecke 110-120 von der Rayleighwellen-Laufzeit auf der Strecke 111-121, so können bei gepulstem Betrieb des Senders über die Laufzeitunterschiede der Rayleighwellen mit einem einzigen Empfänger physikalische oder technische Parameter der die Meßstrecken 100 und 101 benetzenden Flüssigkeiten abgeleitet werden.

In Fig. 5.2 sind zwei Ausführungsbeispiele von Anordnungen von Meßstrecken aus Fig. 5.1 dargestellt: Fig. 5.2a zeigt eine Anordnung gemäß der schematischen Darstellung in Fig. 5.1b. Auf einem Festkörper 1 ist ein Rayleighwellen-Sender S angeordnet, von dem aus Rayleighwellen RW auf die Meßstrecken 100, 101 und 103 treffen, über Ableitungsstrecken 120, 121 und 122 werden die Rayleighwellen den Empfängern E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> zugeführt. Die Strecken mit wellenleitendem Charakter 100-120, 101-121 und 102-122 sind im Beispiel der Fig. 5.2 durch Nuten voneinander getrennt. Die Rayleighwellen werden auf der Festkörperoberfläche 10 jeweils zwischen den Nuten geführt und dem jeweils zugeordneten Empfänger zugeleitet. Werden die Meßstrecken 100, 101 und 102 aus verschiedenen, geeignet gewählten Materialien ausgeführt, so kann die an den Meßstrecken anstehende Flüssigkeit als eine von verschiedenen möglichen Flüssigkeiten identifiziert werden.

In Fig. 5.2b ist ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Anordnung für die Bestimmung einer physikalischen oder technischen Kenngröße eines Schmierstoffes in einem Gleitlager im Teilschnitt dargestellt. In eine Lagerbuchse L ist eine Welle W drehbar gelagert, wobei zwischen Welle und Lagerbuchse Schmierstoff S zur Verringerung der Gleitreibung eingebracht wird. Von einem Sender S<sub>SW</sub> für

Schallwellen werden Volumenwellen auf einen Modenwandler 4 geleitet, der auf der Innenseite der Lagerbuchse Rayleighwellen erzeugt, die in einem zweiten Modenwandler 4' in eine Volumenwelle gewandelt wird und nach Durchgang durch die Buchse auf einen Empfänger E<sub>SW</sub> für Volumenwellen trifft. Als Meßstrecke fungiert in diesem Beispiel der mit Schmierstoff gefüllte Spalt zwischen der Buchse und der Welle. Die Dicke des Schmierstoffes muß dabei in der Regel nicht klein gegen die Rayleighwellenlänge sein, da in diesem Falle eine Anordnung wie in Variante 3 beschrieben vorliegt.

In Fig. 5.3 ist eine erfindungsgemäße Anordnung mit parallel angeordneten Meßstrecken M1, M2 unter Ausnutzung der Modenkonversion im Wellenleiter dargestellt. In einen Festkörper 1 werden mittels eines Senders für Volumenschallwellen S<sub>SW</sub> Schallwellen in den Festkörper 1 eingekoppelt. Diese treffen an der Oberfläche 10 des Festkörpers 1 auf einen Modenwandler 4, von dem aus sich Rayleighwellen RW1 und RW2 ausbreiten. Die Rayleighwellen werden an Modenwandlern 4' und 4'' in Volumenschallwellen SW zurückgewandelt und in Empfängern für Volumenschallwellen E<sub>SW</sub> empfangen. In der gezeigten Anordnung verläuft eine Rayleighwelle RW<sub>1</sub> in der Meßstrecke M1, die mit der zu messenden Flüssigkeit 2 in Kontakt steht und die andere Meßstrecke M2 verläuft an einer Grenzfläche des Festkörpers 1 zu Luft oder Vakuum. Die Meßstrecke M2 dient vorzugsweise als Referenzstrecke für die Meßstrecke M1.

In Fig. 5.4 ist ein Ausführungsbeispiel für den Einbau einer erfindungsgemäßen Meßanordnung in die Wandung W einer Rohrleitung dargestellt. Die Meßstrecke 100 befindet sich an der Außenseite eines stabförmigen Festkörpers 1, der in die in der Rohrleitung zu messenden Flüssigkeit 2 eintaucht. Der Festkörper 1 ist von dem Flansch F durch ein Isoliermaterial I getrennt, in das die auf der Oberfläche des Festkörpers 1 laufenden Rayleighwellen RW nicht einkoppeln können. An der anderen Seite des Festkörpers 1 ist ein Sender S<sub>SW</sub> für Volumenschallwellen SW angeordnet. Volumenschallwellen SW aus diesem Sender S<sub>SW</sub> breiten sich im Inneren des Festkörpers 1 aus und treffen auf einen Modenwandler 4, von dem aus Rayleighwellen RW sich entlang der Oberfläche 10 ausbreiten. Die Rayleighwellen RW1 und RW2 werden mittels Rayleighwellen-Empfänger E<sub>1</sub> und E<sub>2</sub> an dem der Rohrwand W abgelegenen Seite des Festkörpers 1 empfangen. Die Anordnung ist so gewählt, daß die Rayleighwelle RW2 auf dem Teil der Festkörperoberfläche 10 verläuft, der mit der zu messenden Flüssigkeit 2 nicht in Kontakt kommt und von dieser durch einen Schallisolator I getrennt ist, in den die RW2 nicht einkoppeln kann. Das Signal des Empfängers E<sub>2</sub> wird bei der Auswertung der Meßergebnisse als Referenzwert für die Konversionsgüte des Modenwandlers 4 benutzt. RW2 verläuft wenigstens teilweise in einem Bereich, der mit der Flüssigkeit 2 im Kontakt steht und die Meßstrecke 100 bildet.

In Fig. 5.5 sind Beispiele für Wellenleiter gezeigt, auf denen Rayleighwellen RW auf ihrem Weg von Sender zum Empfänger wenigstens einmal reflektiert werden. In Fig. 5.5a ist die Oberfläche eines Rayleighwellen tragenden, im wesentlichen U-förmigen Festkörpers dargestellt. Eine Rayleighwelle breitet sich in einem Schenkel des U's längs eines Wellenleiters aus, der die Meßstrecke M enthält und trifft auf eine vorzugsweise unter 45 Grad angeordnete Begrenzung B des Festkörpers. Die ebenen Rayleighwellen werden daran reflektiert, treffen auf die gegenüberliegende Begrenzungskante B' und werden in den anderen Schenkel des U's reflektiert. In Fig. 5.5b ist eine Anordnung mit gleicher Form des Wellenleiters gezeigt, wobei die Rayleighwelle auf der Festkörperoberfläche 10 durch Nuten N geführt wer-



den, deren Tiefe wenigstens der Wellenlänge der Rayleighwelle entsprechen. Derartige Nuten können entweder mechanisch in einen Festkörper eingearbeitet werden, beim Herstellungsprozeß des Wellenleiters durch Spritzgießen erzeugt werden oder beispielsweise durch Photoätzen auf eine Festkörperoberfläche aufgebracht werden. In Fig. 5.5a und b wird die Rayleighwelle zweimal reflektiert, um vom Sender zum Ort des Empfängers zu gelangen. Entsprechend den Gesetzen der Optik ebener Wellen sind auch Wellenleiter mit einer reflektierenden Begrenzung (V-förmiger Wellenleiter) oder mit mehr als zwei reflektierenden Begrenzungen realisierbar. Ebenso stellt eine Festkörperoberfläche, bei der nach Durchgang der Rayleighwelle durch die Meßstrecke ein Gitter für Rayleighwellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Rayleighwellen angeordnet ist, einen erfindungsgemäßen Wellenleiter dar. Eine solche Anordnung ist dann zweckmäßig, wenn die aus einer Meßstrecke auslaufende Rayleighwelle eine breite Wellenfront besitzt, deren Energie nahezu vollständig auf einen im Vergleich dazu kleinen Empfänger geleitet werden soll. Ebenso sind Wellenleiter vorstellbar, bei denen nach Durchgang der Rayleighwelle durch die Meßstrecke die Oberfläche des Wellenleiters eine Sammellinse für Rayleighwellen trägt, in der die Rayleighwellen zum Empfänger hin gebeugt werden. Insbesondere kann die Meßstrecke als Linse für Rayleighwellen ausgebildet werden.

In Fig. 5.5c ist eine Anordnung eines Rayleighwellen RW tragenden Festkörpers 1 und einer kompakten Sender-Empfänger-Anordnung gezeigt. An den Festkörper 1 ist ein Schaltungsträger ST akustisch angekoppelt (beispielsweise unter Verwendung von Modenwandlern), der einen Sender S, die zum Betrieb des Senders notwendige elektronische Schaltung SE, den Empfänger E sowie die zum Betrieb des Empfängers notwendige elektronische Schaltung EE, eine Schnittstellen- und Auswerteschaltung trägt, die über eine Kontaktleiste K mit einer Spannungsversorgung und einem Auswerte- und Steuersystem verbunden ist. Eine solche Schaltung kann beispielsweise als Dickschichtschaltung auf einem keramischen Schaltungsträger ST angeordnet sein, der schallleitende Eigenschaften besitzt. Eine derartige Anordnung von kompakter Elektronik und einem, mit dieser lösbar verbundenen Wellenleiter für Rayleighwellen kommt vorzugsweise dort zum Einsatz, wo der Wellenleiter nach einem Meßvorgang ausgetauscht werden muß (z. B. bei der Messung irreversibler Polymerisationsvorgänge in der Flüssigkeit). In solchen Ausnahmefällen wird der kostengünstig herstellbare Wellenleiter für eine Einmalbenutzung ausgelegt.

#### Bezugszeichenliste

1 Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1a Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1b Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1c Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1d Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1e Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1ee Walze  
 1f Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1ff Walze  
 1h Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1g Festkörper (der die Meßstrecke trägt)  
 1i Festkörperoberfläche / Grenzfläche  
 11 Grenzschicht (in der sich die Rayleighwelle RW ausbreitet)  
 100 Meßstrecke  
 101 Meßstrecke  
 102 Meßstrecke

103 Meßstrecke  
 104 Meßstrecke  
 105 Meßstrecke  
 106 Meßstrecke  
 110 Zuleitungsstrecke für akustische Energie zur Meßstrecke  
 111 Zuleitungsstrecke für akustische Energie zur Meßstrecke  
 120 Ableitungsstrecke für akustische Energie zum Empfänger  
 121 Ableitungsstrecke für akustische Energie zum Empfänger  
 130 Strecke mit Wellenleiterscharakter  
 131 Grenze des Bereichs mit Wellenleiterscharakter  
 140 Rotationsachse  
 150 Abstreifer  
 151 Abstreifer / Rührer  
 151a Hohlachse  
 2 Medium (das an die Flüssigkeit angrenzt und der Meßstrecke gegenüberliegt)  
 2a Medium mit schlechter akustischer Ankoppelbarkeit, z. B. Gas  
 2b Medium mit guter akustischer Ankoppelbarkeit (wie Meßstrecke) und mit einer im Vergleich zum Festkörper der Meßstrecke höheren Rayleighwellengeschwindigkeit  
 2b Begrenzungselemente  
 2c Medium mit gleicher Rayleighwellengeschwindigkeit wie die Meßstrecke, vorzugsweise identisch mit dem Festkörper der Meßstrecke  
 2d Medium mit im Vergleich zur Meßstrecke ungleicher Rayleighwellengeschwindigkeit, aber daran angepaßter Neigung ihrer Grenzflächen  
 2e Medium mit im Vergleich zur Meßstrecke größerer Geschwindigkeit für die Kompressionswelle  
 20 Festkörperoberfläche / Grenzfläche  
 21 Grenzschicht (in der sich die Rayleighwelle RW ausbreitet)  
 200 Meßstrecke  
 3 Flüssigkeit  
 3a Flüssigkeitsschicht dünner  $\lambda_{KW}/4$   
 3b Flüssigkeitsschicht dünner oder gleich oder dicker  $\lambda_{KW}/4$   
 4 Moderwandler  
 40 Reflektor  
 5 akustisches Übertragungssystem  
 60 Störquelle  
 61 Abstreifer  
 62 Rohrleitung  
 70 akustisches Koppellement / Abstreifer  
 71 akustisches Koppelsystem  
 72 Keilwandler  
 73 Keilwandler  
 d Dicke der Flüssigkeitsschicht  
 E Empfänger  
 E<sub>RW</sub> Empfänger für Rayleighwellen  
 E<sub>KW</sub> Empfänger für Kompressionswellen  
 E<sub>VW</sub> Empfänger für Volumenschallwellen  
 S Sender  
 S<sub>RW</sub> Sender für Rayleighwellen  
 S<sub>VW</sub> Sender für Volumenschallwellen  
 60 RW Rayleighwelle  
 KW Kompressionswelle in der Flüssigkeit  
 VW Volumenschallwelle im Festkörper  
 $v^{(1)}_{RW}$  Rayleighgeschwindigkeit der Meßstrecke (in der ersten Festkörpergrenzschicht)  
 $v^{(2)}_{RW}$  Rayleighgeschwindigkeit in der zweiten, gegenüberliegenden Festkörpergrenzschicht  
 $v_{KW}$  Schallgeschwindigkeit der Kompressionswelle in der Flüssigkeit

$\lambda_{RW}$  Wellenlänge der Rayleighwelle

$\lambda_{KW}$  Wellenlänge der Kompressionswelle

(1) Index für die Meßstrecke / den ersten Festkörper

(2) Index für den der Meßstrecke gegenüberliegenden zweiten Festkörper

<sup>n</sup> Index für die Flüssigkeit

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen physikalischer oder technischer Größen von Flüssigkeiten (3, 3a, 3b), einschließlich hochviskoser, teigiger oder pastöser Medien, unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems (Sender-Meßstrecke-Empfänger 5) mit wenigstens einer von einer Festkörperoberfläche aus nichtpiezoelektrischem Material gebildeten Meßstrecke (100-106), die mit dem zu vermessenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbar ist, wobei zumindest ein Teil der akustischen Energie der Meßstrecke (100-106) in Form von Rayleighwellen (RW) zur Verfügung gestellt wird und sich die Rayleighwelle (RW) auf der Meßstrecke (100-106) über wenigstens  $\lambda_{RW}/8$ , vorzugsweise mehr als  $2\lambda_{RW}$  der erzeugten Rayleighwelle (RW) ausbreitet, und daß das akustische Übertragungssystem (5) zumindest zwischen dem Beginn der Meßstrecke (100-106) und dem Empfänger ( $H_{RW}$ ,  $E_{KW}$ ,  $E_{VW}$ ) nach dem Prinzip eines Wellenleiters arbeitet, wobei zur Ermittlung der zu messenden Größe ausschließlich Veränderungen wenigstens einer Kenngröße der Rayleighwelle (RW) zugrunde gelegt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellen über einen Oberflächenbereich geleitet werden, der funktioneller Bestandteil einer Vorrichtung ist, z. B. einer Arbeitsmaschine oder einer massiven Wandung, und somit die Meßstrecke bildet.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß über die Meßstrecke Energie, z. B. Wärme, elektrische, magnetische oder optische Energie oder akustische Energie in das Medium eingekoppelt oder ausgekoppelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ermittlung der zu messenden Größe ausschließlich der dissipative Energieverlust der Rayleighwelle (RW) in der Meßstrecke (100-106) herangezogen wird.
5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtdicke (d) des zu messenden Mediums auf der Meßstrecke (100-106) auf einen Bereich begrenzt wird, der größer als die viskose Grenzschichtdicke und kleiner als die zur Ausbildung der Grundschwingung einer stehenden Kompressionswelle (KW) notwendigen Flüssigkeitsschicht ist, vorzugsweise auf einen Bereich unterhalb  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW).
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht des zu messenden Mediums von einer ablaufenden Flüssigkeitsschicht (3a) (geneigte Platte 1b oder rotierende Scheibe, zentrifugierte Flüssigkeit) gebildet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht des zu messenden Mediums eine Flüssigkeitsschicht (3a) ist, die durch ein relativ zur Meßstrecke bewegtes, parallel geführtes mechanisches Element (150, 151) begrenzt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht des zu messenden Mediums eine

Flüssigkeitsschicht ist, die durch einen Abstreifer begrenzt wird, und daß über den Abstreifer Rayleighwellen in die Meßstrecke oder eine davorliegende Zuleitungsstrecke eingekoppelt werden.

9. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht des zu messenden Mediums eine Flüssigkeitsschicht ist, die durch ein zur Meßstrecke parallel und periodisch geführtes mechanisches Element (Abstreifer, z. B. Kolben im Zylinder) begrenzt wird, und daß der Meßvorgang mit der gleichen Periode oder einem Vielfachen dieser Periode durchgeführt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit entlang der Ausbreitungsrichtung der Rayleighwelle (RW) bei der Auswertung der Meßergebnisse berücksichtigt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtdicke des zu messenden Mediums durch einen Spalt begrenzt wird, der einerseits durch die Meßstrecke (100, 106) und andererseits eine gegenüberliegende Wandung eines Festkörpers (2b) begrenzt wird, deren Rayleighwellengeschwindigkeit größer ist als die der Meßstrecke (100, 106).

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das zu messende Medium von einem Flüssigkeitsstrom gebildet wird, wobei die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit entlang der Ausbreitungsrichtung der Rayleighwelle (RW) bei der Auswertung der Meßergebnisse berücksichtigt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß an der Festkörperoberfläche der Meßstrecke die Rayleighwellen (RW) in Kompressionswellen (KW) konvertiert und in das zu messende Medium mit einer Schichtdicke, die größer als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW) sein kann, abgestrahlt werden, und daß die Kompressionswellen (KW) möglichst vollständig von einer im Abstand zur Meßstrecke verlaufenden Festkörperoberfläche aufgefangen werden.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Energie der Kompressionswellen (KW) an der der Meßstrecke gegenüberliegenden Festkörperoberfläche wieder zu Rayleighwellen (RW) konvertiert wird.

15. Verfahren nach Anspruch 13 und 14, dadurch gekennzeichnet, daß die an der der Meßstrecke gegenüberliegenden Festkörperoberfläche angeregten Rayleighwellen (RW) ihrerseits Kompressionswellen (KW) in die angrenzende Flüssigkeit auskoppeln, die wiederum an der Festkörperoberfläche der Meßstrecke Rayleighwellen (RW) anregt.

16. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Energie der Kompressionswellen (KW) an der der Meßstrecke gegenüberliegenden Festkörperoberfläche zu Volumenschallwellen (VW) in diesem gegenüberliegenden Festkörper konvertiert werden.

17. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Auskopplung von Energie aus der Kompressionswelle (KW), die sich entlang der Meßstrecke ausbreitet, in eine Flüssigkeitsschicht, die dicker als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW) ist, dadurch unterbunden wird, daß das die Meßstrecke bildende Material derart ausgewählt wird, dessen Rayleighwellengeschwindigkeit kleiner der Schallgeschwindigkeit der Kompressionswelle (KW) des zu messenden angrenzenden Mediums ist.

18. Verfahren zum Messen physikalischer oder technischer

scher Größen von Flüssigkeiten einschließlich hochviskoser, teigiger oder pastöser Medien, unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems (Sender-Meßstrecke-Empfänger) mit wenigstens einer von einer Festkörperoberfläche gebildeten Meßstrecke (100), die mit dem zu vermessenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbar ist, wobei zumindest ein Teil der akustischen Energie der Meßstrecke (100) in Form von Rayleighwellen (RW) zur Verfügung gestellt wird und sich die Rayleighwelle (RW) auf der Meßstrecke (100) über wenigstens  $\lambda/8$ , vorzugsweise mehr als  $2\lambda$  der erzeugten Rayleighwelle (RW) ausbreitet, und wobei zumindest ein Teil der vom Sender (S) ausgehenden akustischen Welle auf ihrem Weg zum Empfänger (E) wenigstens einmal einen Modenwandler (4, 4', 4'') durchläuft, wobei dieser Teil seiner Wellenenergie wenigstens teilweise seine Mode von einer Rayleighwelle (RW) in eine Volumenschallwelle (VW) oder umgekehrt konvertiert wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellen (RW) über eine Meßstrecke (100) aus einem nichtpiezoelektrischen Material geleitet werden, wobei die Meßstrecke (100) einen funktionalen Bestandteil einer Vorrichtung, wie z. B. einer Arbeitsmaschine, eines Behälters, eines Transportsystems etc., bildet.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß vom Sender ( $S_{VW}$ ) in dem die Meßstrecke (100) tragenden bzw. bildenden Festkörper (1) Volumenschallwellen (VW) angeregt werden, die von einem in unmittelbarer Nähe der Meßstrecke (100) angeordneten Modenwandler (4) in Rayleighwellen (RW) konvertiert werden, die anschließend die Meßstrecke (100) durchlaufen.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellen (RW) nach dem Durchlaufen der Meßstrecke (M1) von einem sich an die Meßstrecke (M2) anschließenden zweiten Modenwandler (4', 4'') in Volumenschallwellen (VW) rückkonvertiert werden, die sich bis zu einem volumenschallwellensensitiven Empfänger ( $E_{SW}$ ) ausbreiten.

21. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellen (RW) nach dem Durchlaufen der Meßstrecke (100) direkt oder nach dem Durchlaufen einer sich daran anschließenden Ableitungsstrecke (120) von einem rayleighwellensensitiven Empfänger ( $E_{RW}$ ) sensiert werden.

22. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellen (RW) nach dem Durchlaufen der Meßstrecke reflektiert werden, so daß sie die Meßstrecke in der Gegenrichtung ein zweites Mal durchlaufen und wieder auf den Modenwandler (4) treffen, der die zurücklaufende Rayleighwelle (RW) wieder in eine Volumenschallwelle (VW) konvertiert, die sich bis zum Empfänger (12) ausbreitet.

23. Verfahren nach wenigstens einem der Ansprüche 18 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß das akustische Übertragungssystem zumindest zwischen dem Beginn der Meßstrecke (100) und dem Empfänger ( $E_{RW}$ ,  $E_{KW}$ ,  $E_{VW}$ ) nach dem Prinzip eines Wellenleiters arbeitet, wobei zur Ermittlung der zu messenden Größe ausschließlich Veränderungen wenigstens einer Kenngröße der Rayleighwelle (RW) zugrunde gelegt werden.

24. Vorrichtung zum Messen physikalischer oder technischer Größen von Flüssigkeiten (3, 3a, 3b), einschließlich hochviskoser teigiger oder pastöser Medien, unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems (Sender-Meßstrecke-Empfänger 5) mit

wenigstens einer von einer Festkörperoberfläche gebildeten Meßstrecke (100–106), die mit dem zu vermessenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbar ist, wobei die Meßstrecke (100–106) wenigstens auf einer solchen Länge zur Fortleitung von Rayleighwellen (RW) geeignet ist, die  $\lambda_{RW}/8$ , vorzugsweise mehr als  $2\lambda_{RW}$  der erzeugten Rayleighwelle (RW) entspricht, und daß das akustische Übertragungssystem (5) zwischen dem Beginn der Meßstrecke (100–106) und dem Empfänger ( $E_{RW}$ ,  $E_{KW}$ ,  $E_{VW}$ ) nach dem Prinzip eines Wellenleiters ausgebildet ist, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstrecke aus einem nichtpiezoelektrischen Material besteht und daß die Vorrichtung zur Erregung von Rayleighwellen und/oder die Vorrichtung zur Sensierung von Rayleighwellen einerseits und die Meßstrecke andererseits separate Bauteile sind.

25. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Periodendauer der Rayleighwelle größer als die Relaxationszeit der zu vermessenden Flüssigkeit ist.

26. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 25, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zwecke der Viskositätsmessung für die Meßstrecke ein solches Material vorgesehen ist, daß die Periodendauer der Rayleighwelle möglichst nahe der Relaxationszeit der zu vermessenden Flüssigkeit gewählt werden kann.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 24 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstrecke von einer Legierung, insbesondere von einer nach dem Schmelzspinnverfahren hergestellten Legierung gebildet ist.

28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 24 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstrecke von einer durch Bestrahlung mit strukturverändernden Strahlen erzeugten Schicht oder von einer durch Laserbehandlung, Ionenimplantation oder Gasimplantation veränderten Schicht gebildet ist.

29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 24 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstrecke funktioneller Bestandteil einer Vorrichtung ist, z. B. einer Arbeitsmaschine oder einer massiven Wandung.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 24 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßstrecke Mittel zur Einkopplung oder Auskopplung von Energie, z. B. von Wärme, von elektrischer, magnetischer oder optischer Energie oder von akustischer Energie mit einer von der Rayleighwelle verschiedenen Frequenz, aufweist.

31. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtdicke (d) einer zu messenden Flüssigkeitsschicht (3a, 3b) auf der Meßstrecke (100–106) mindestens der viskosen Grenschichtdicke und weniger als der zur Ausbildung der Grundschiwingung einer stehenden Welle notwendigen Flüssigkeitsschicht entspricht, vorzugsweise weniger als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW).

32. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörperoberfläche der Meßstrecke (101) als geneigte Platte (1b) ausgebildet ist.

33. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörperoberfläche der Meßstrecke als ebenes oder kegelförmiges, drehbar gelagertes Element ausgebildet ist, über dessen Rotationsgeschwindigkeit die zur Begrenzung der Schichtdicke notwendige Zentrifugalkraft erzeugbar ist.

34. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 31, dadurch gekennzeichnet, daß der Festkörperoberfläche der

Meßstrecke ein Abstreifer (150, 151) zugeordnet ist, der die Flüssigkeitsschicht (3a) auf ein vorher bestimmtes Maß reduziert.

35. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 31, dadurch gekennzeichnet, daß der Festkörperoberfläche der Meßstrecke eine Abblasvorrichtung zugeordnet ist, die ein Anwachsen der Flüssigkeitsschicht auf ein vorher bestimmtes Maß begrenzt.

36. Vorrichtung nach Anspruch 24 und 31, dadurch gekennzeichnet, daß gegenüber der Festkörperoberfläche der Meßstrecke und parallel dazu in einem Abstand von höchstens  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW) eine weitere, einen Spalt bildende Festkörperoberfläche angeordnet ist, deren Schallgeschwindigkeit für die Rayleighwelle (RW) größer als die Rayleighwellengeschwindigkeit der Festkörperoberfläche der Meßstrecke ist.

37. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß gegenüber der Festkörperoberfläche der Meßstrecke und dazu parallel in einem Abstand, der größer als  $\lambda_{KW}/4$  der Kompressionswelle (KW) sein kann, eine weitere Festkörperoberfläche angeordnet ist, deren Rayleighwellengeschwindigkeit kleiner oder gleich der Schallgeschwindigkeit der Festkörperoberfläche der Meßstrecke ist.

38. Vorrichtung nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörperoberflächen der Meßstrecke und des im Abstand gegenüberliegenden Elements aus Materialien gleicher Rayleighwellengeschwindigkeit, insbesondere aus identischen Materialien bestehen.

39. Vorrichtung nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, daß die Rayleighwellengeschwindigkeit des der Meßstrecke gegenüberliegend angeordneten Festkörpers kleiner als die Rayleighwellengeschwindigkeit der Meßstrecke ist.

40. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörperoberflächen der Meßstrecke und des im Abstand gegenüberliegenden Elements aus Materialien unterschiedlicher Rayleighwellengeschwindigkeit bestehen und in einem solchen Winkel zueinander angeordnet sind, daß durch die von der Festkörperoberfläche der Meßstrecke ausgehende Kompressionswelle auf der gegenüberliegenden Festkörperoberfläche Rayleighwellen angeregt werden.

41. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörperoberflächen der Meßstrecke und des im Abstand gegenüberliegenden Elements aus Materialien unterschiedlicher Rayleighwellengeschwindigkeit bestehen und in einem solchen Winkel zueinander angeordnet sind, daß durch die von der Festkörperoberfläche der Meßstrecke ausgehende Kompressionswelle (KW) im gegenüberliegenden Festkörper Volumenschallwellen (VW) angeregt werden.

42. Vorrichtung nach Anspruch 39 und 41, dadurch gekennzeichnet, daß der gegenüberliegende Festkörper mit einem Empfänger in Verbindung steht, der zum Sensieren von Volumenschallwellen (VW) geeignet ist.

43. Vorrichtung nach Anspruch 39 und 41, dadurch gekennzeichnet, daß der gegenüberliegende Festkörper ein Empfänger zum Sensieren von Kompressionswellen (KW) ist.

44. Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Festkörpergrenzfläche der Meßstrecke mit einer zusätzlichen Vorrichtung zur Energiezuführung oder Energieabführung in Verbindung steht.

45. Vorrichtung nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß die die Meßstrecke bildende Grenzschicht oder der die Meßstrecke ausbildende Festkörper elektrisch leitfähig ausgebildet und mit einer Gleich- oder Wechselspannungsquelle verbunden ist, um ein elektrisches Feld in der zu messenden Flüssigkeit zu erzeugen, und daß die zu messende Flüssigkeit eine polare oder eine elektroreologische oder eine Flüssigkeit mit Ionen dissoziierten Bestandteilen ist.

46. Vorrichtung nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß die die Meßstrecke bildende Grenzschicht oder der die Meßstrecke ausbildende Festkörper mit einer Wärmequelle oder mit einer anderen wärmeerzeugenden Energiequelle, z. B. einer elektrischen Spannungsquelle zum Betreiben der Meßstrecke als Widerstandsheizung, in Verbindung steht.

47. Vorrichtung nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß die die Meßstrecke bildende Grenzschicht oder der die Meßstrecke ausbildende Festkörper optisch durchlässig und gegebenenfalls optisch wellenleitend ausgebildet ist und mit einer Lichtquanten erzeugenden Energiequelle, z. B. einer LASER-Quelle, in Verbindung steht.

48. Vorrichtung nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß die die Meßstrecke bildende Grenzschicht oder der die Meßstrecke ausbildende Festkörper in thermischer Verbindung mit einer Kühlvorrichtung steht oder einen Teil dieser Kühlvorrichtung bildet.

49. Vorrichtung nach Anspruch 48, dadurch gekennzeichnet, daß die die Meßstrecke bildende Grenzschicht oder der die Meßstrecke ausbildende Festkörper Teil eines Peltierelements ist.

50. Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß im akustischen Übertragungssystem wenigstens ein Modenwandler vorgesehen ist, der eine Volumenschallwelle (VW) in eine Rayleighwelle (RW) oder umgekehrt konvertiert.

51. Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß Sender und Empfänger als einstückige Einheit ausgebildet sind, wobei die Einheit abwechselnd im Sendemodus und Empfangsmodus betrieben wird.

52. Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß im akustischen Übertragungssystem wenigstens ein Reflektor vorgesehen ist, der zur Umlenkung der auf ihn auftreffenden Wellenmode geeignet ist.

53. Vorrichtung zum Messen physikalischer oder technischer Größen von Flüssigkeiten, einschließlich hochviskoser teigiger oder pastöser Medien, unter Verwendung eines akustischen Übertragungssystems (Sender-Meßstrecke-Empfänger) mit wenigstens einer von einer nichtpiezoelektrischen Festkörperoberfläche gebildeten Meßstrecke (100), die mit dem zu vermessenden Medium zumindest teilweise in Kontakt bringbar und ein funktionaler Bestandteil einer Vorrichtung, wie z. B. einer Arbeitsmaschine, eines Behälters, eines Transportsystems etc., ist, wobei die Meßstrecke wenigstens auf einer solchen Länge zur Fortleitung von Rayleighwellen (RW) geeignet ist, die  $\lambda/8$ , vorzugsweise mehr als  $2\lambda$  der erzeugten Rayleighwelle (RW) entspricht, und daß in Wirkverbindung zur Meßstrecke (100) oder zu einem mit der Meßstrecke (100) verbundenen Bereich wenigstens ein Modenwandler (4, 4', 4'') angeordnet ist, der

a) eine vom Sender (S) zur Meßstrecke (100) hinlaufende Volumenschallwelle (VW) in eine Ray-

leighwelle (RW) konvertiert und/oder  
 b) eine von der Meßstrecke (100) zum Empfänger (E) rücklaufende Rayleighwelle (RW) in eine Volumenschallwelle (VW) konvertiert.

54. Vorrichtung nach Anspruch 53, dadurch gekennzeichnet, daß Sender ( $S_{VW}$ ) und Empfänger ( $E_{VW}$ ) auf der Rückseite des die Meßstrecke tragenden bzw. bildenden Festkörpers (1) angeordnet sind und mit jeweils einem am Beginn bzw. am Ende der Meßstrecke vorgesehenen Modenwandler (4, 4', 4'') Volumenschallwellen (VW) leitend in Verbindung stehen. 10

55. Vorrichtung nach Anspruch 53, dadurch gekennzeichnet, daß Sender und Empfänger als einstückige Baueinheit ( $S_{VW}/E_{VW}$ ) ausgebildet und auf der Rückseite des die Meßstrecke tragenden bzw. bildenden Festkörpers (1h) angeordnet sind und mit einem am Beginn der Meßstrecke vorgesehenen Modenwandler (4) Volumenschallwellen (VW) leitend in Verbindung stehen, und daß am Ende der Meßstrecke ein Reflektor (40) vorgesehen ist, der die Rayleighwelle (RW) in Richtung des Modenwandlers (4) reflektiert. 20

---

Hierzu 31 Seite(n) Zeichnungen

---

25

30

35

40

45

50

55

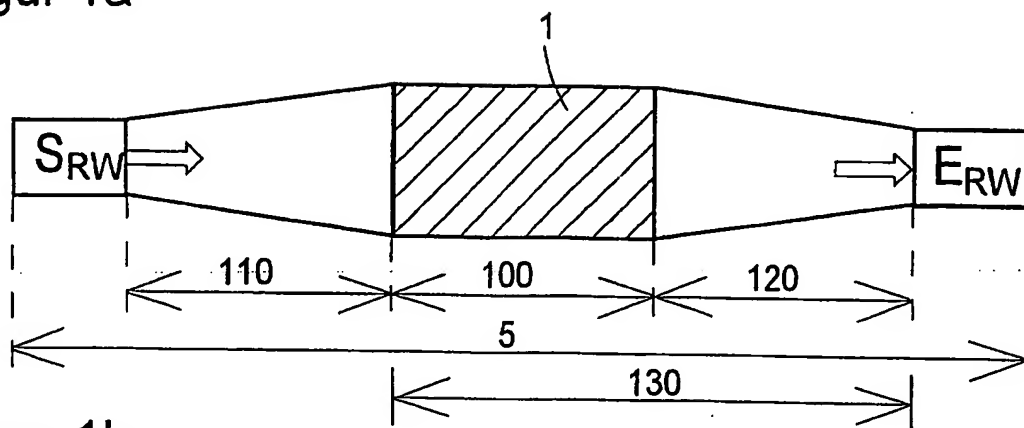
60

65

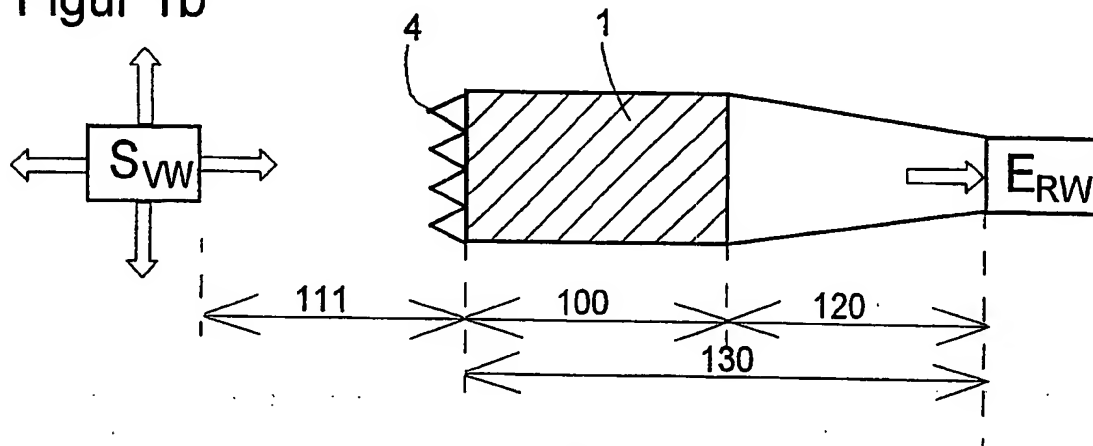


- Leerseite -

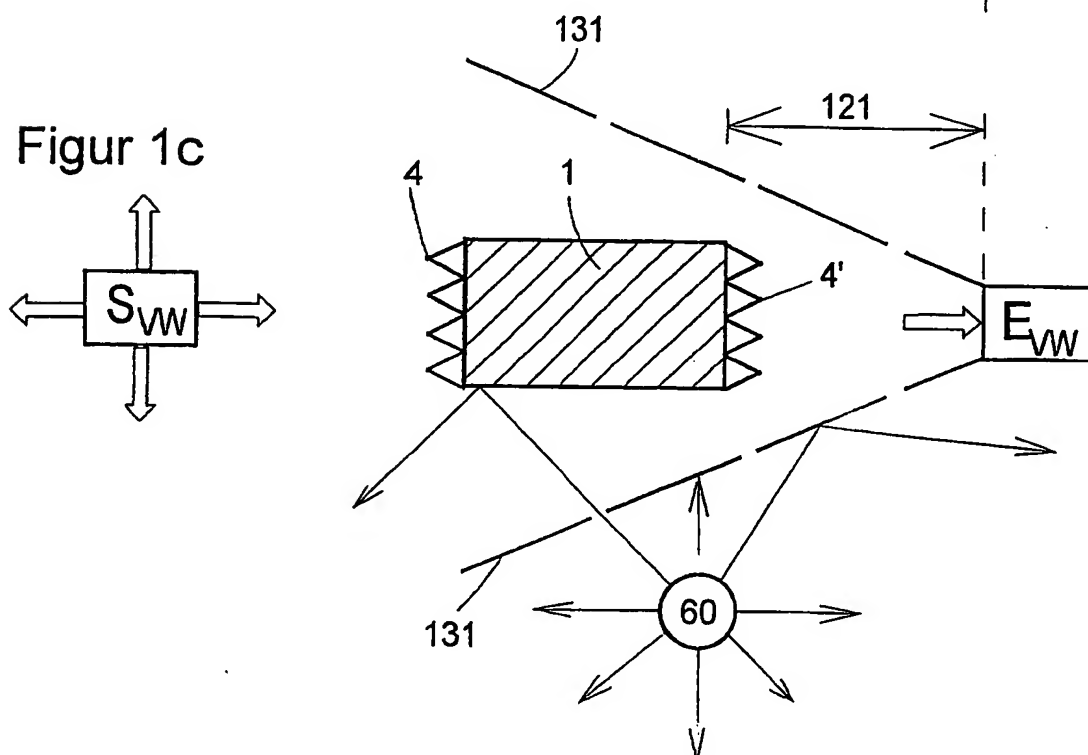
Figur 1a



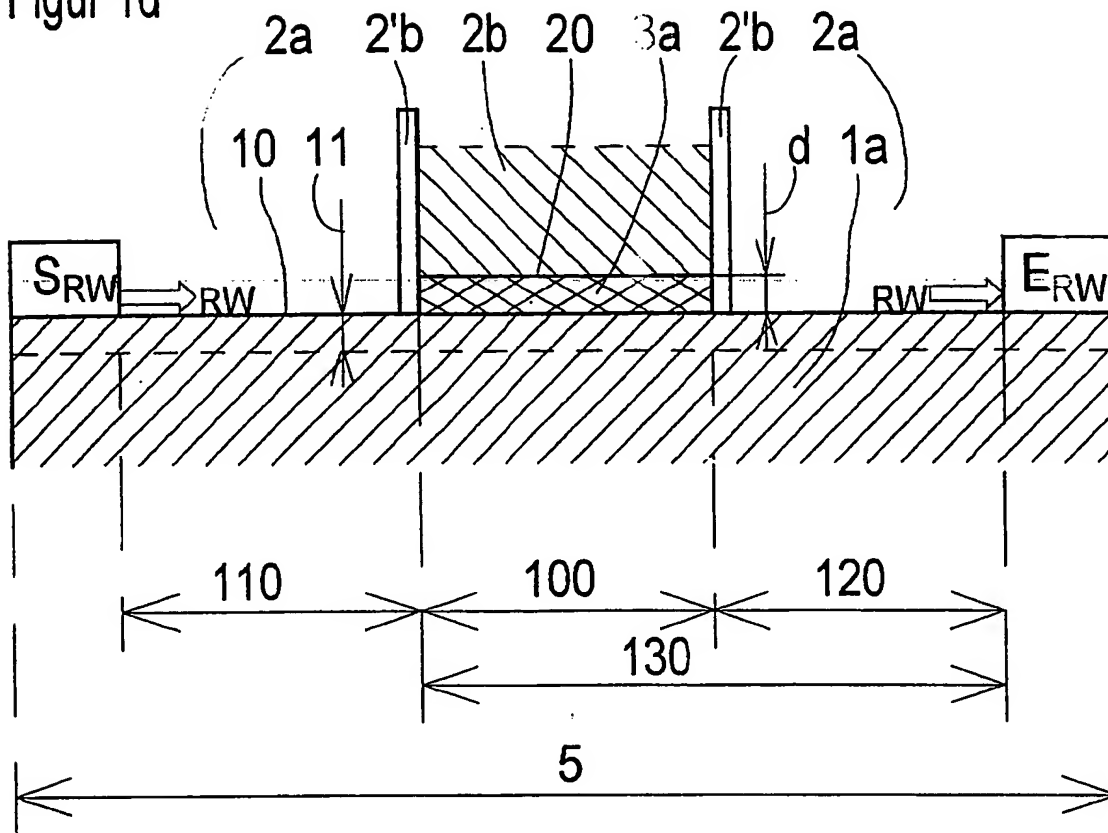
Figur 1b



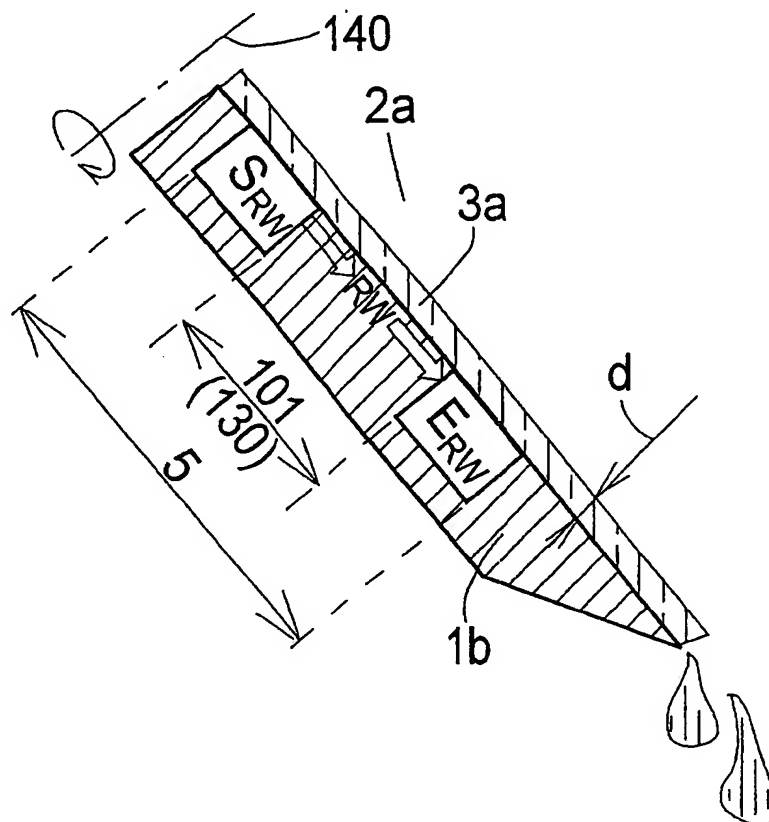
Figur 1c



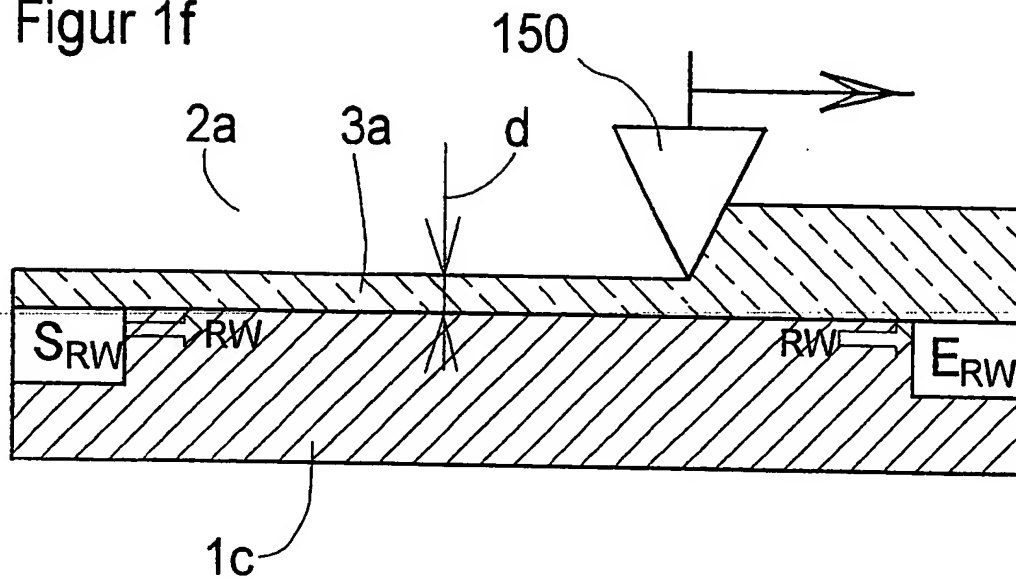
Figur 1d



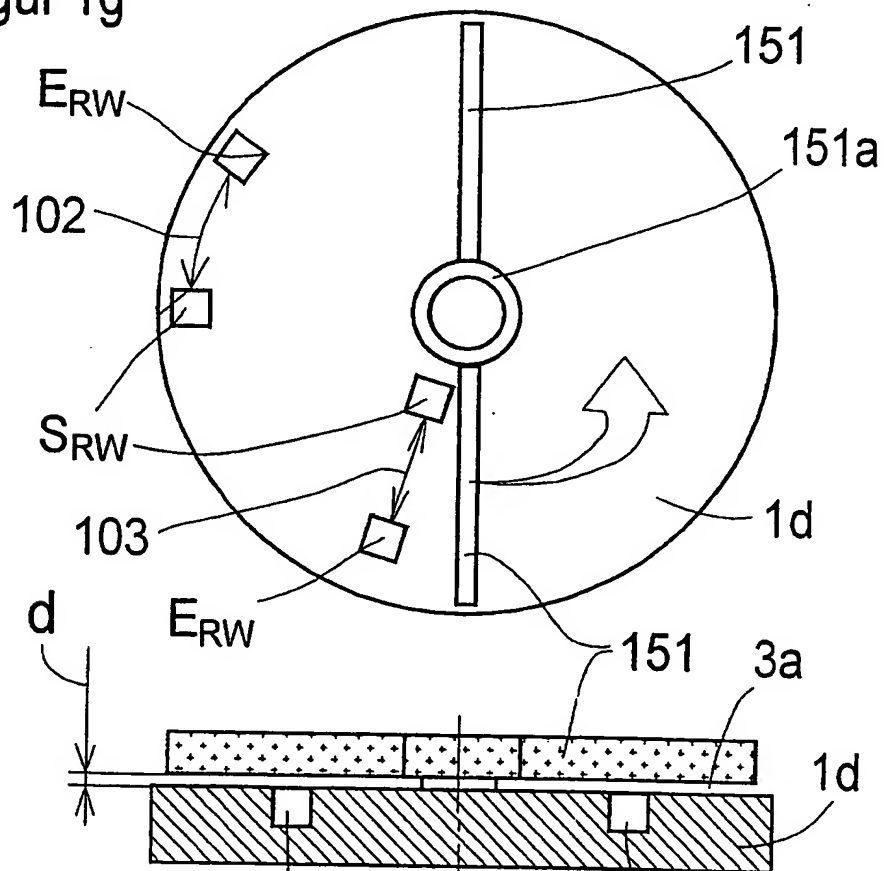
Figur 1e



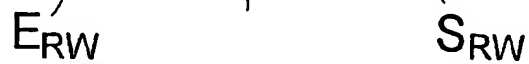
Figur 1f



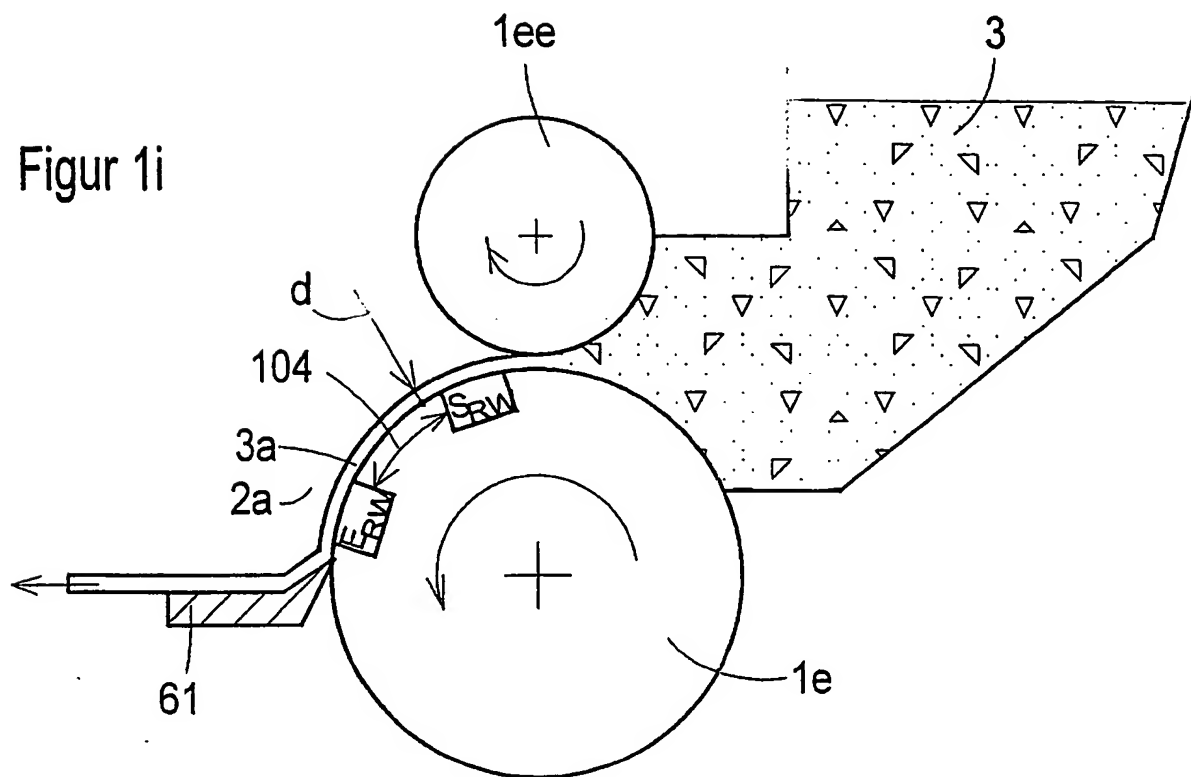
Figur 1g



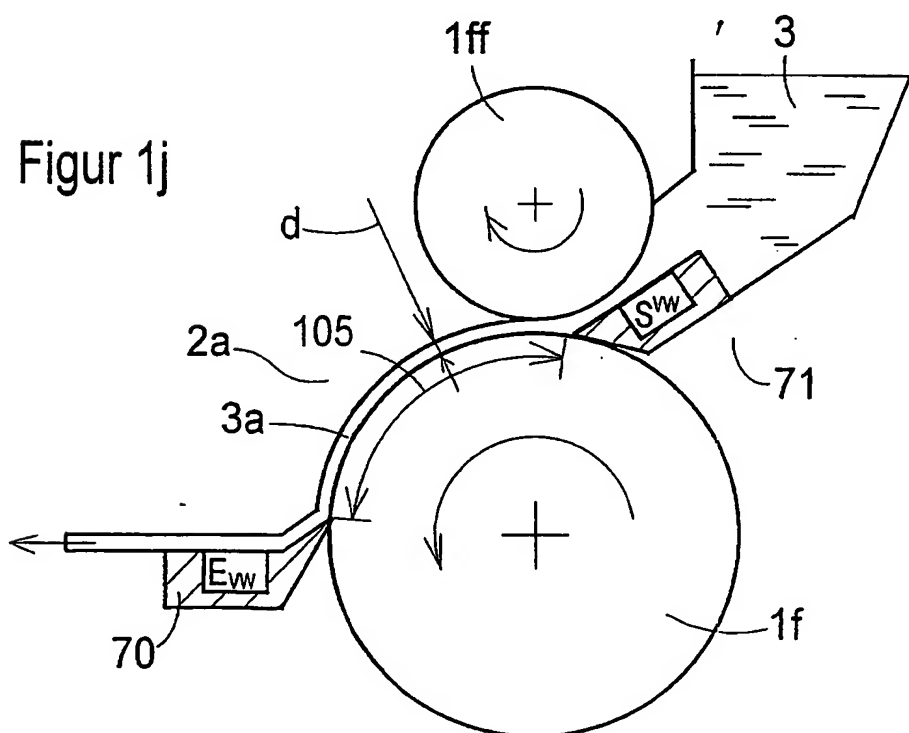
Figur 1h



Figur 1i



Figur 1j



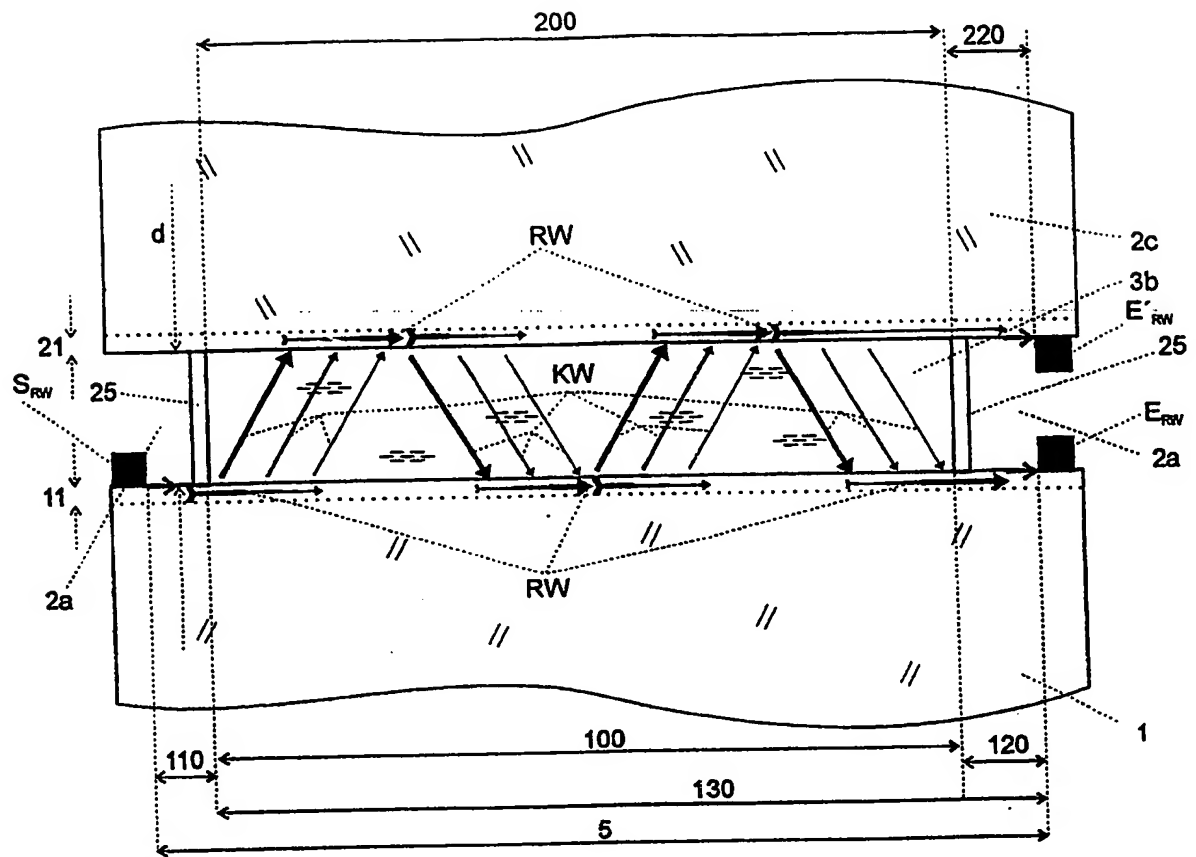




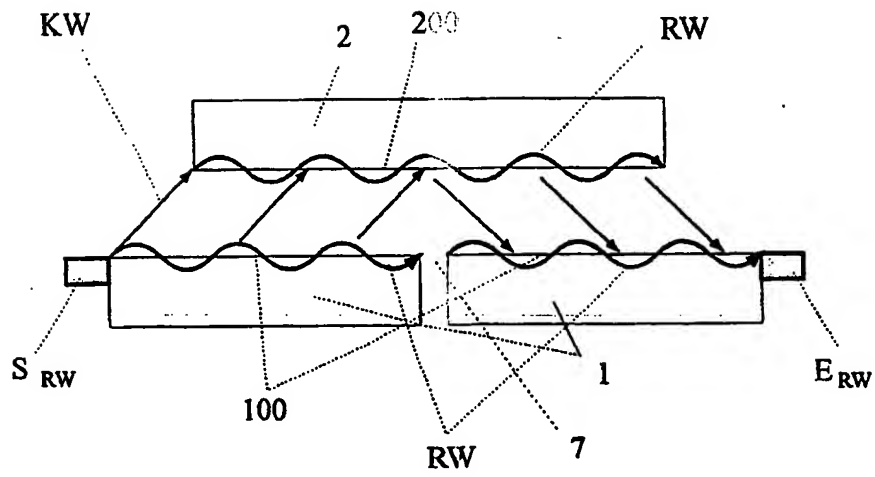
Figur 11

Diagram illustrating a cross-sectional view of a device, likely a turbine or pump component. The diagram shows a horizontal section labeled  $S_{vw}/E_{vw}$  and a vertical section labeled  $3$ . A curved line labeled  $1h$  is shown. A vertical line labeled  $4$  is indicated. A hatched area labeled  $2b$  is shown. A vertical line labeled  $3a$  is shown. A vertical line labeled  $62$  is shown. A horizontal line labeled  $d$  is shown. A vertical line labeled  $40$  is shown. A vertical line labeled  $RW$  is shown.

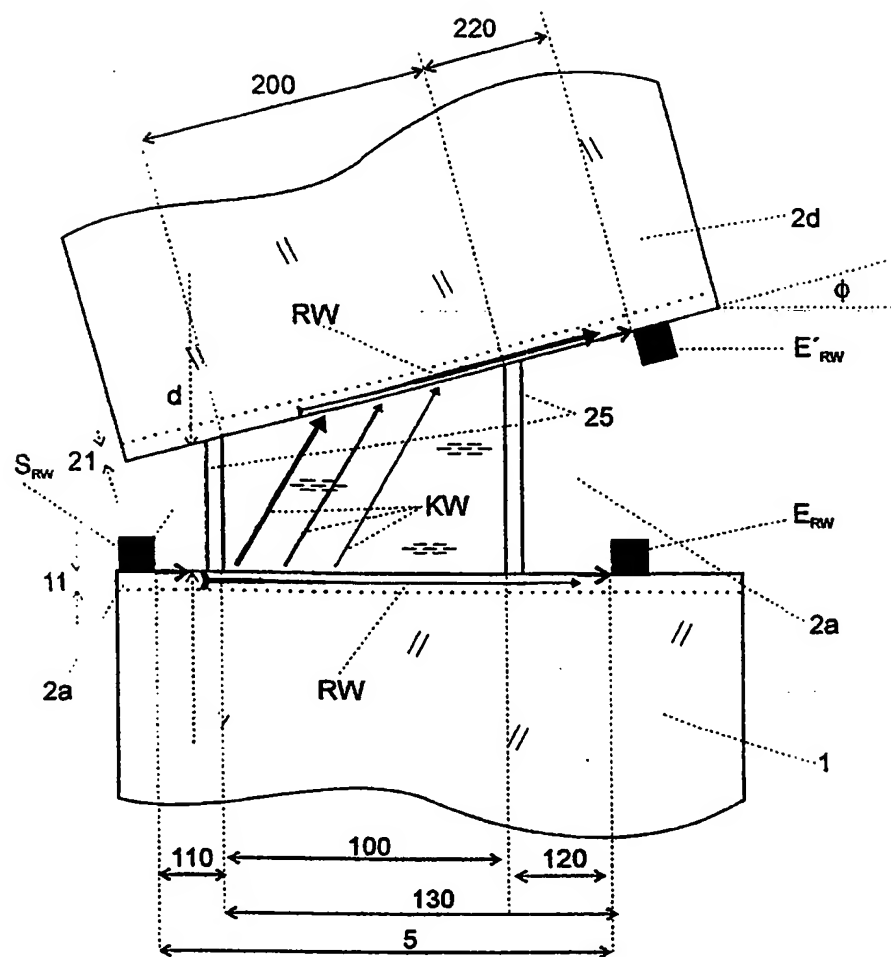
Figur 1m



Figur 2-1

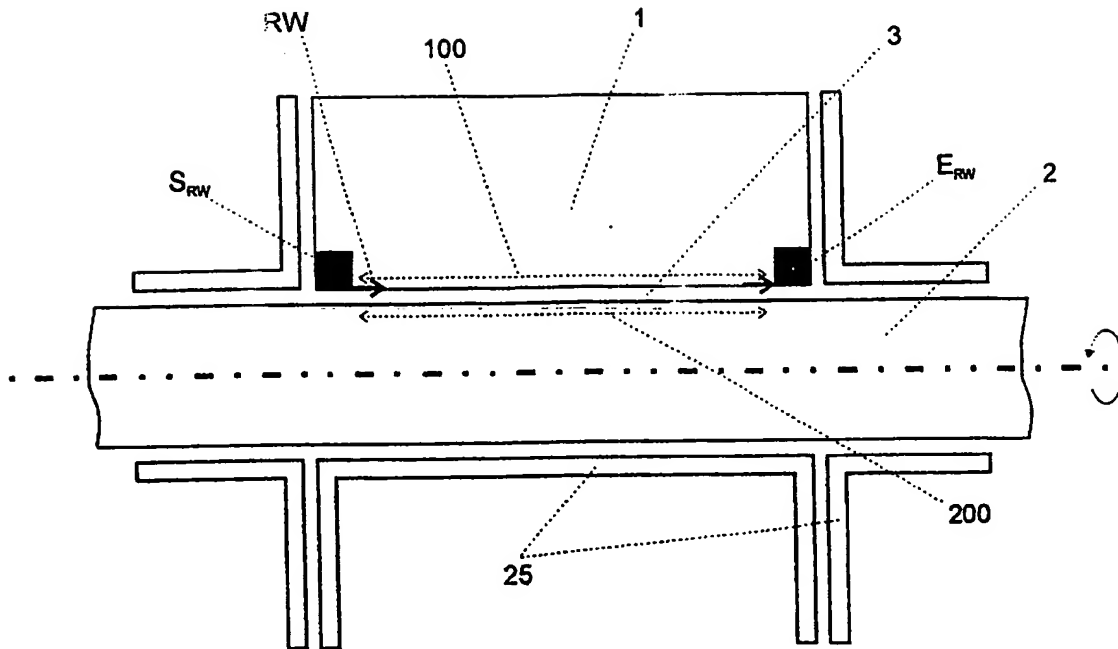


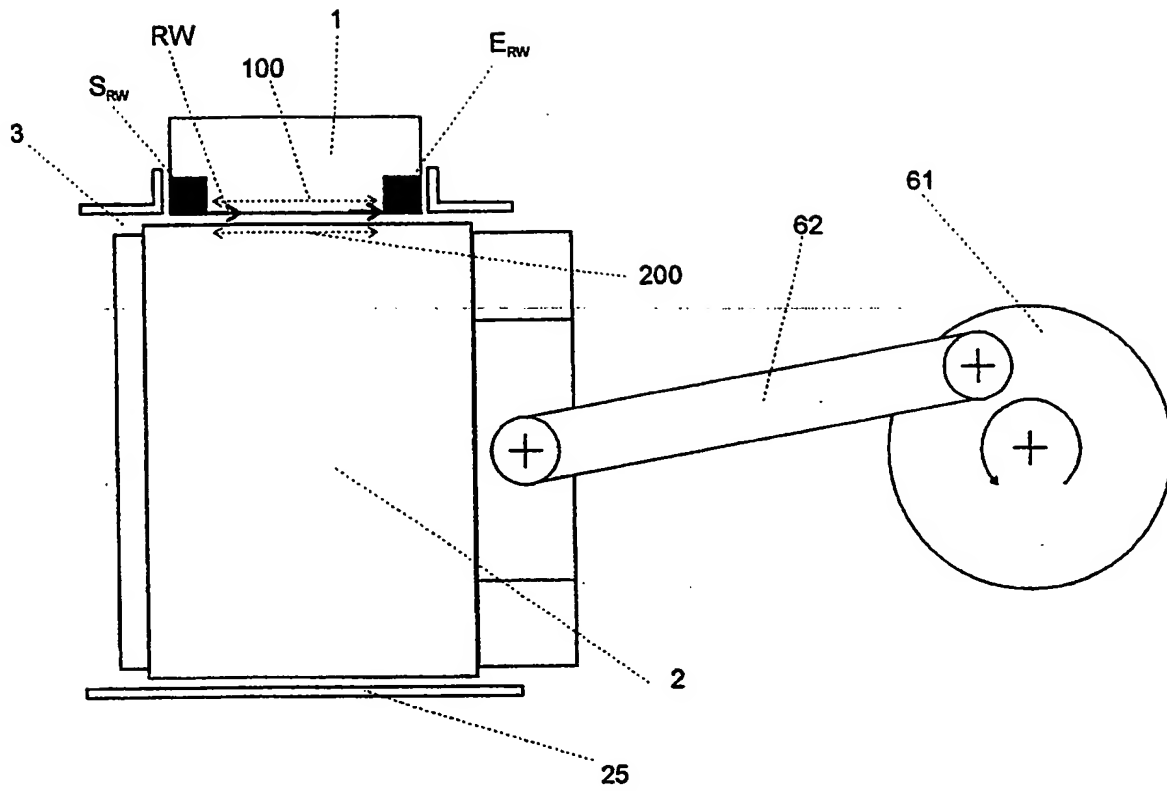
Figur 2-2



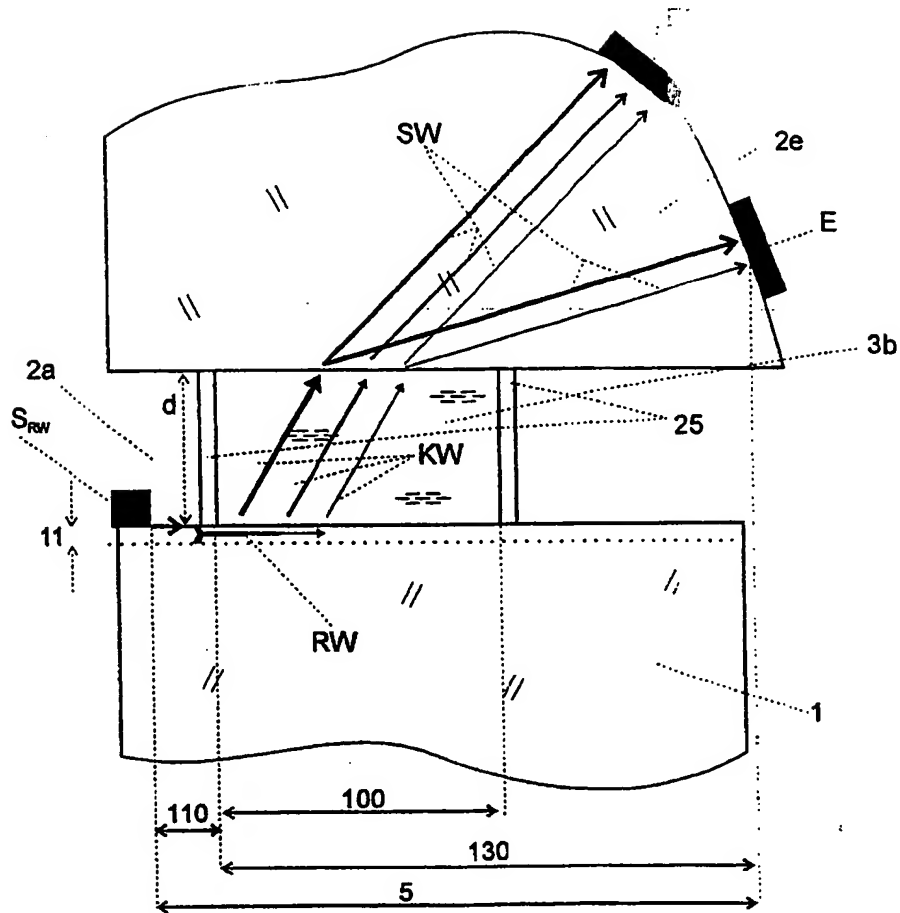
**Figur 2-3**



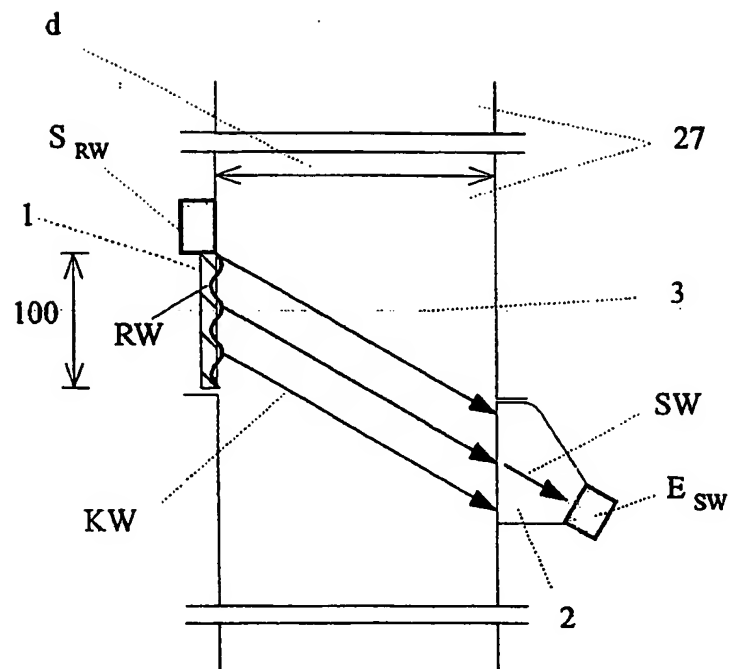
**Figur 2-4**



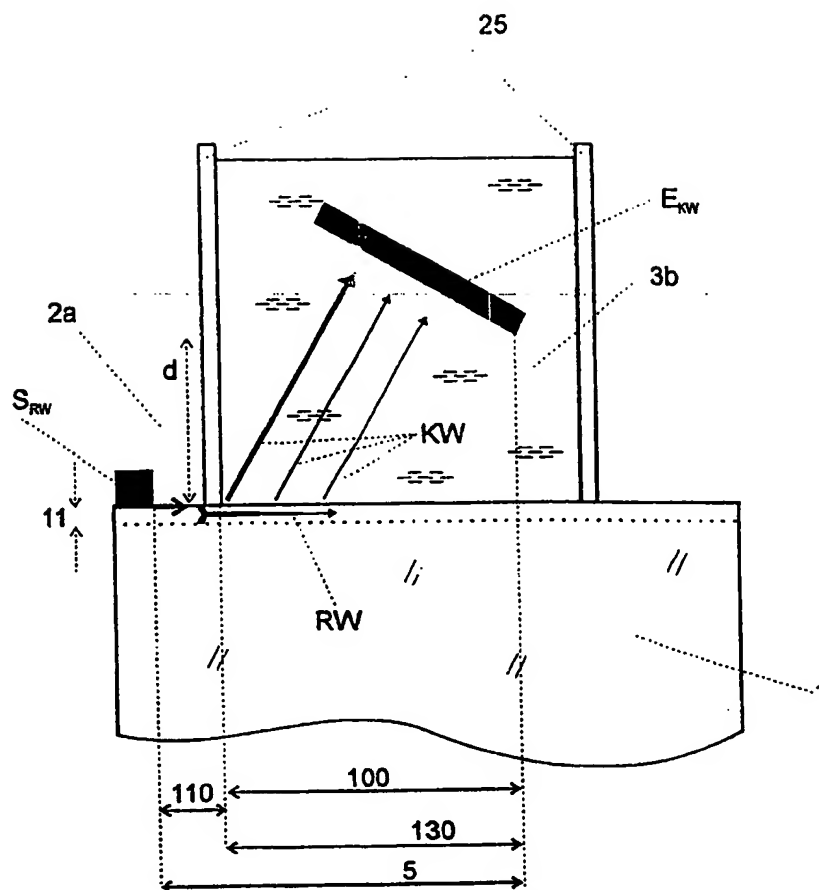
Figur 2-5



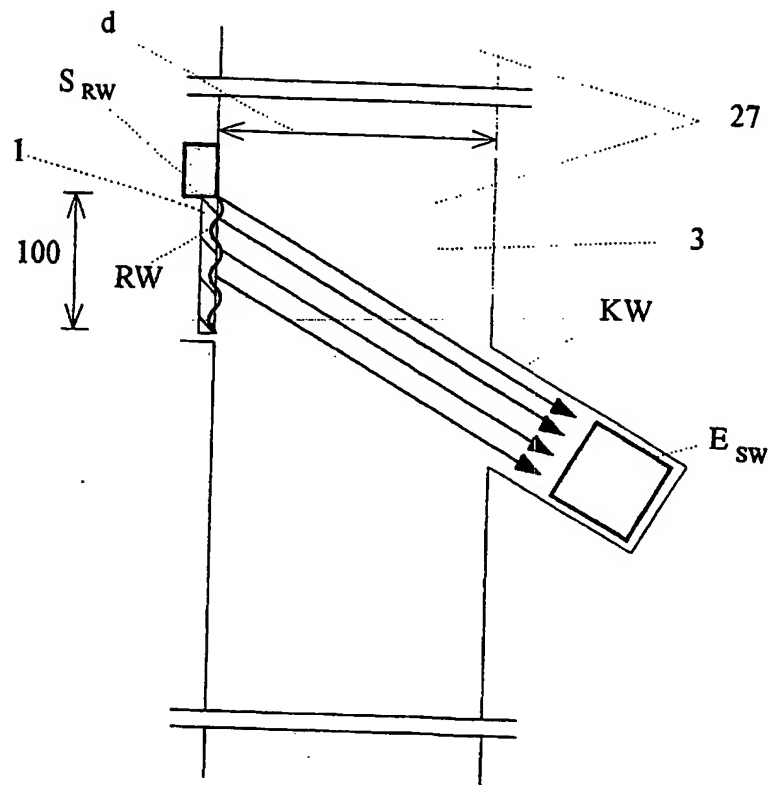
Figur 2-6



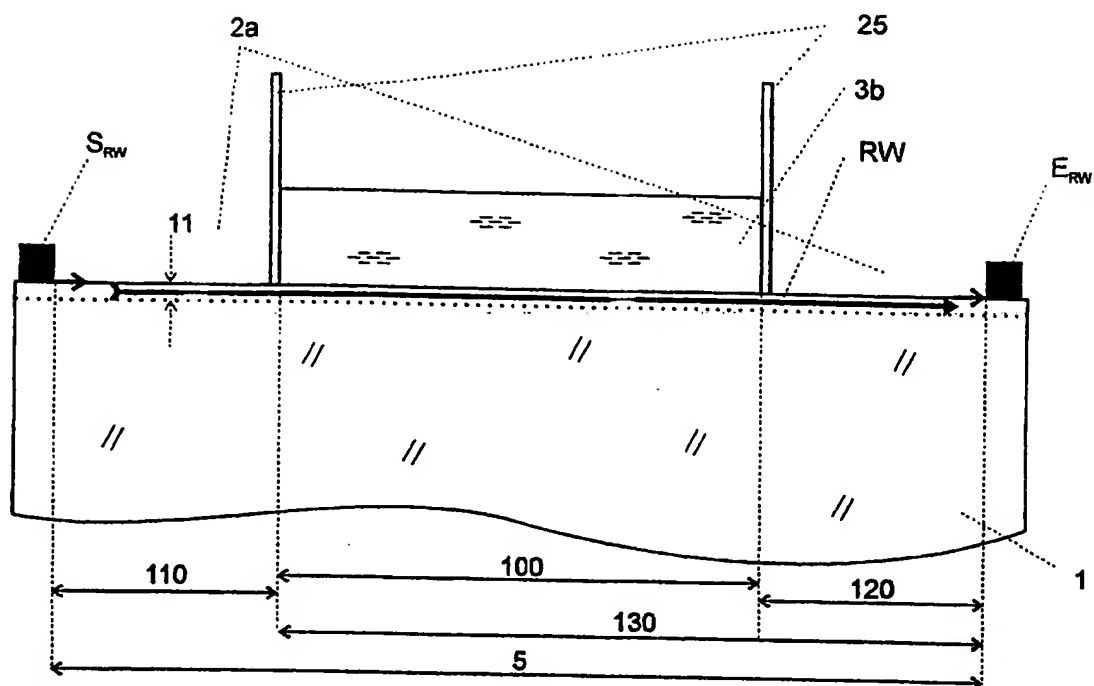
Figur 2-7



**Figur 2-8**

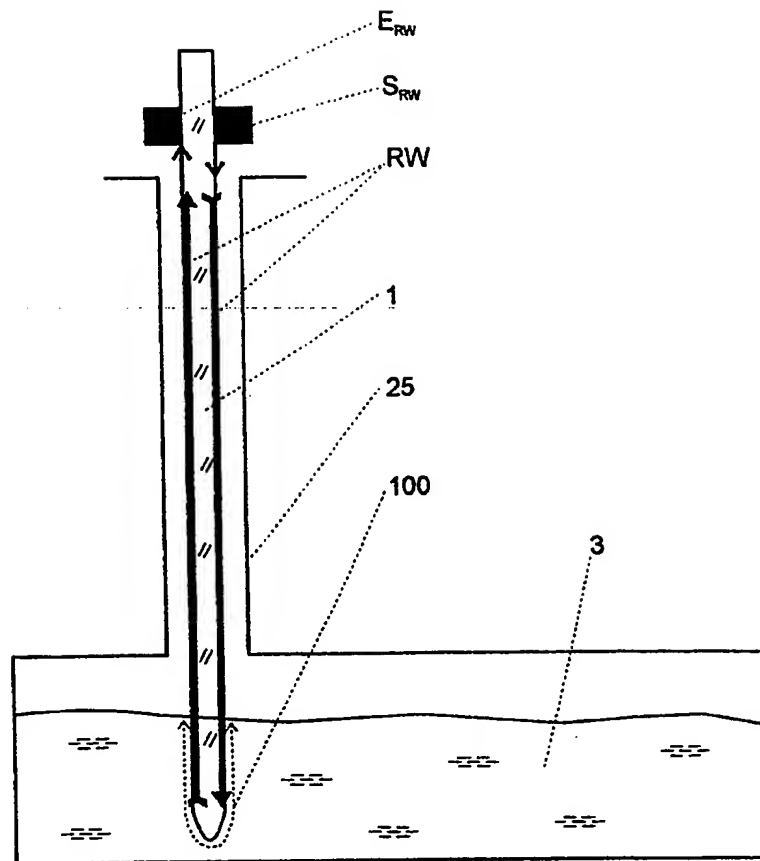


Figur 2-9

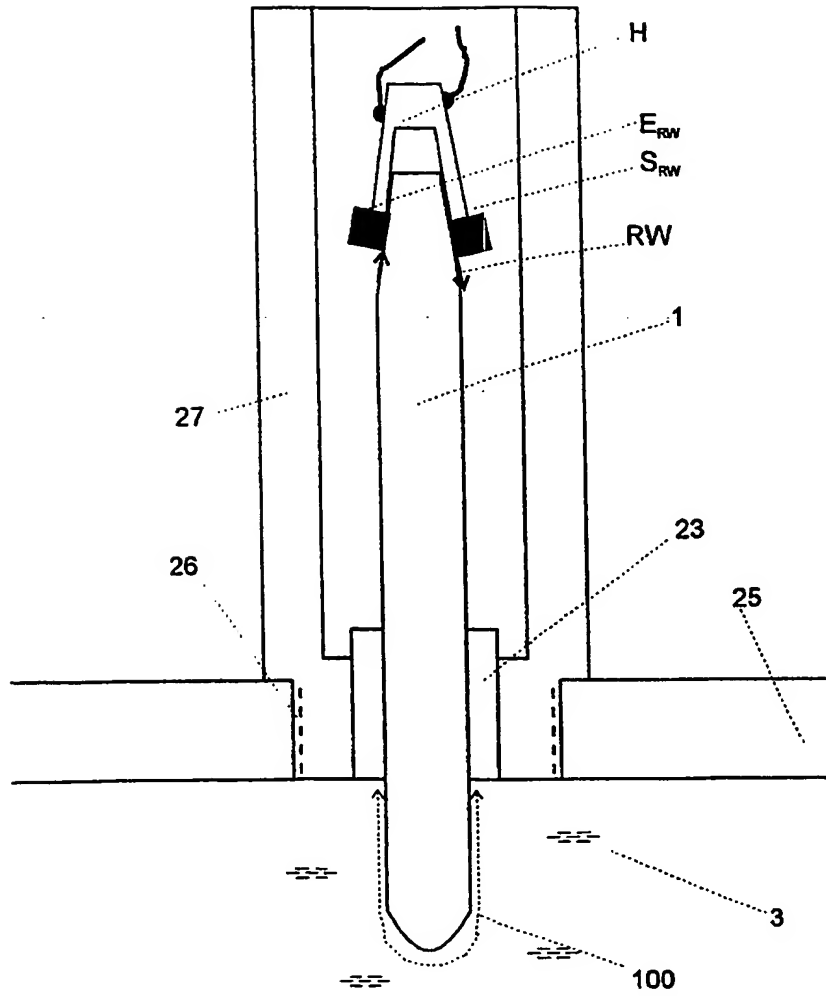


Figur 3-1

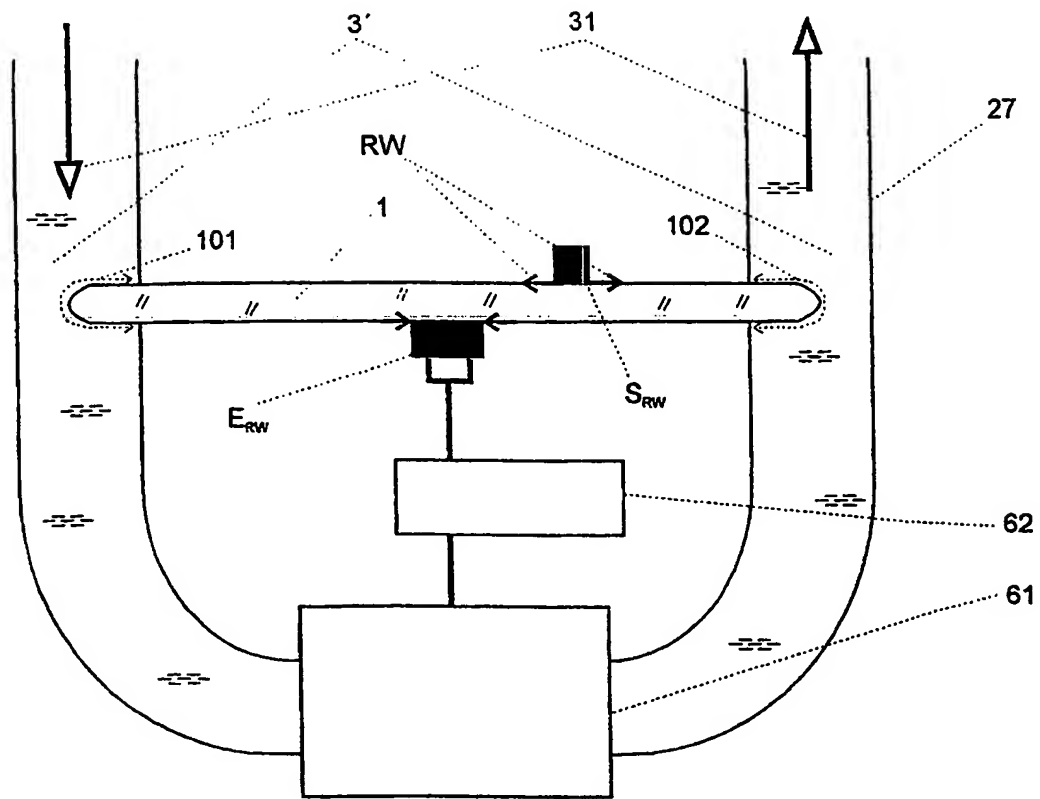




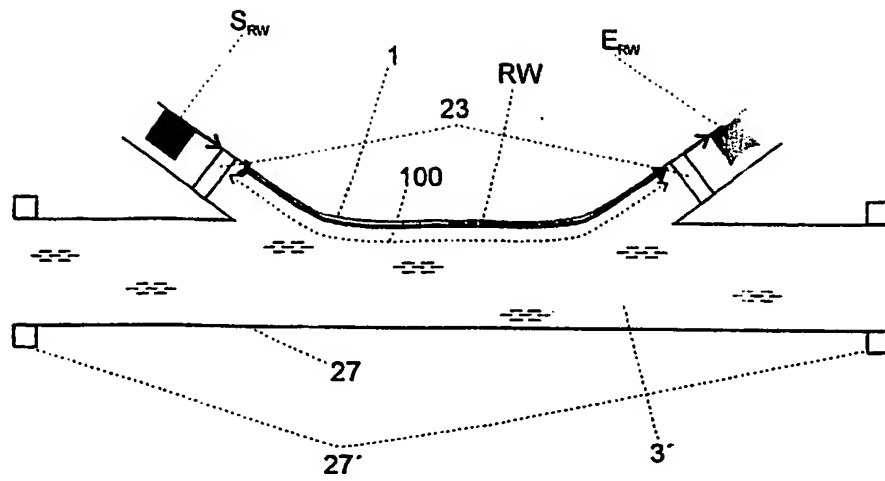
Figur 3-2



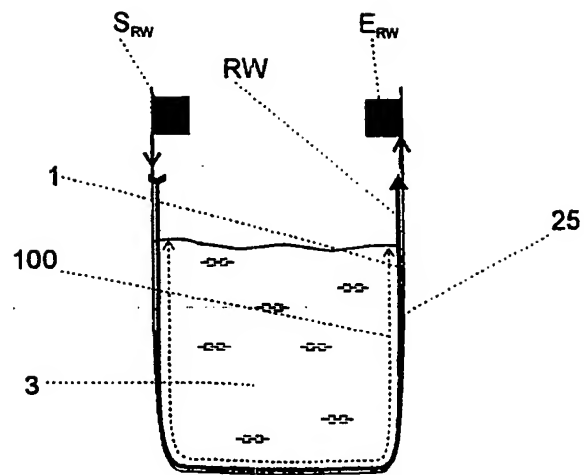
Figur 3-3



Figur 3-4

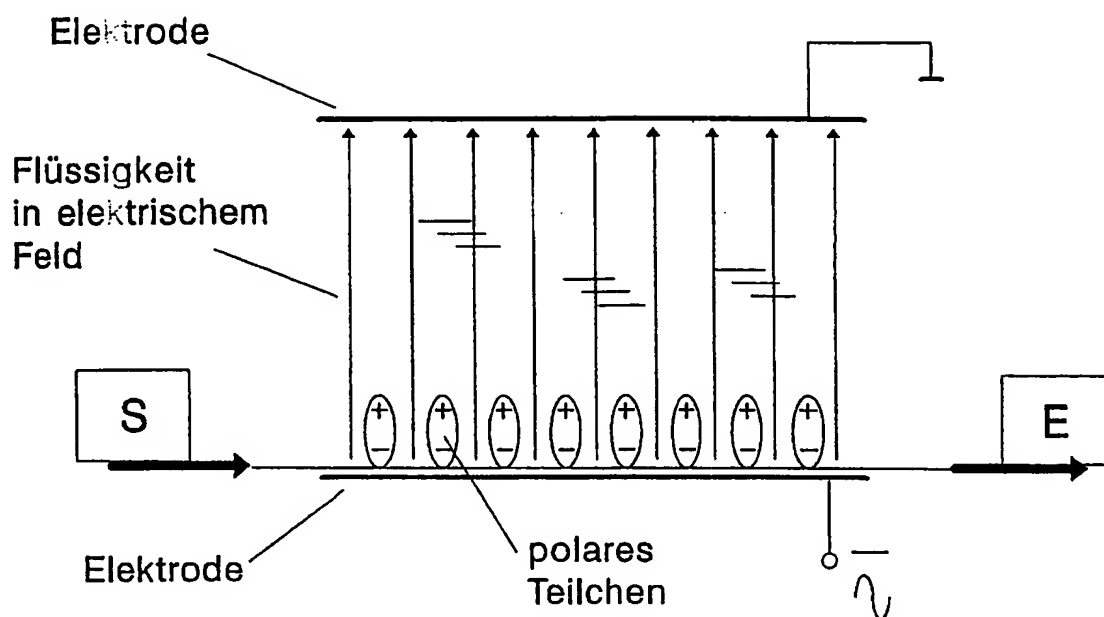


Figur 3-5



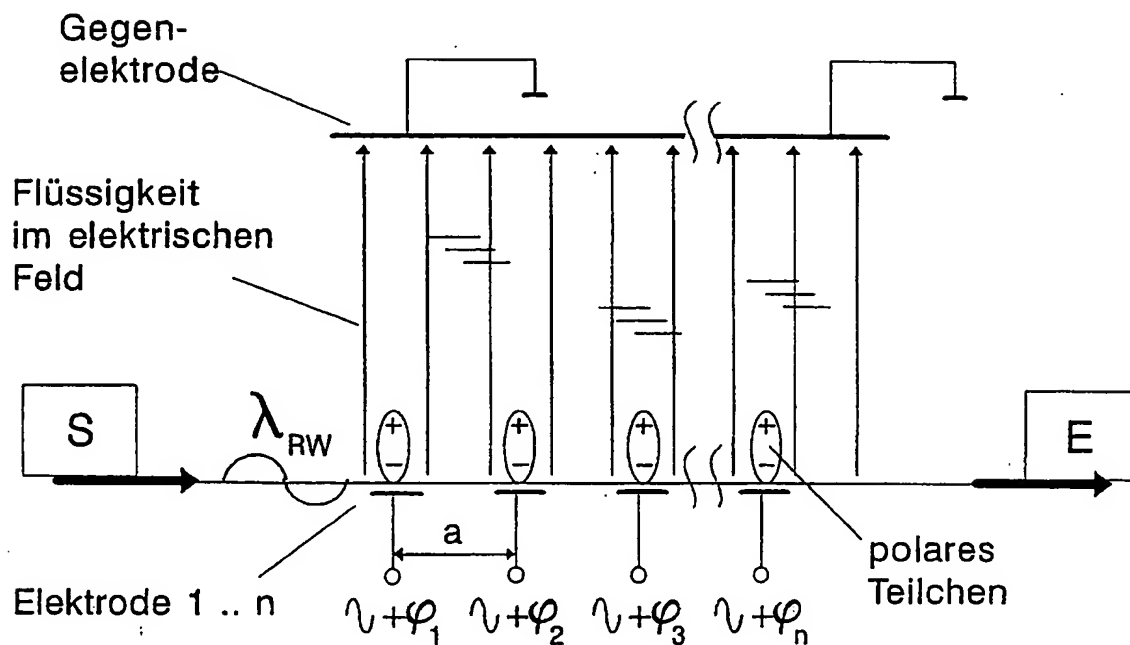
Figur 3-6

Figur 4-1



OFWVI4-1

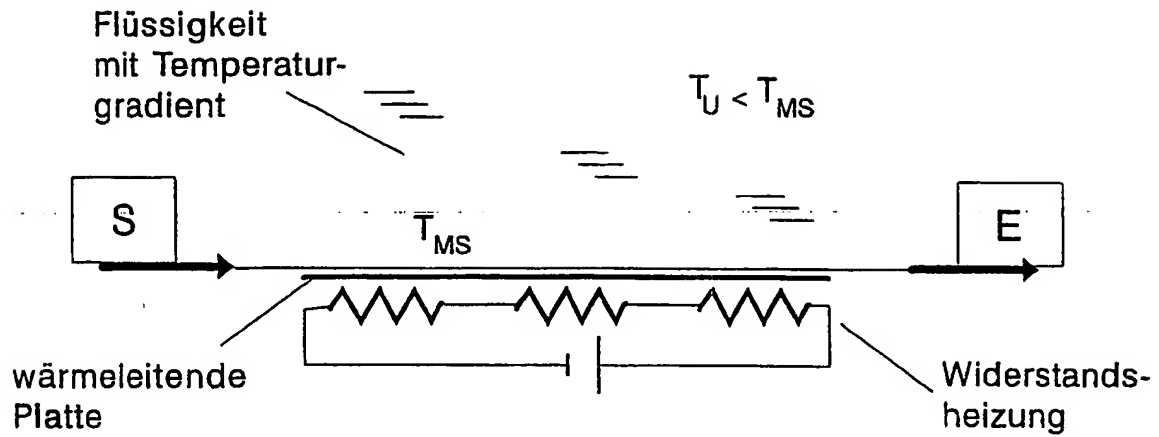
Figur 4-2:



OFWVI4-2

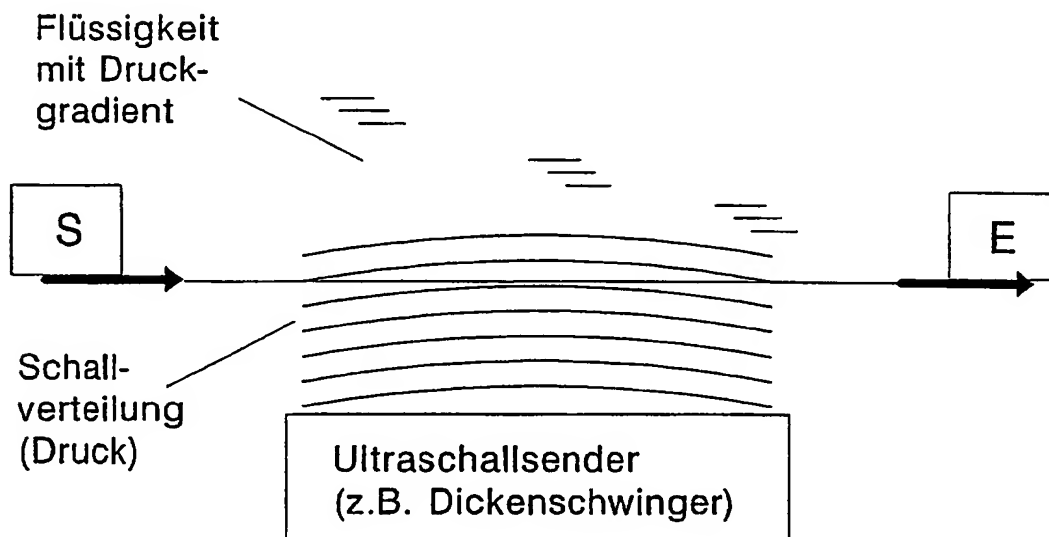


Figur 4-3:



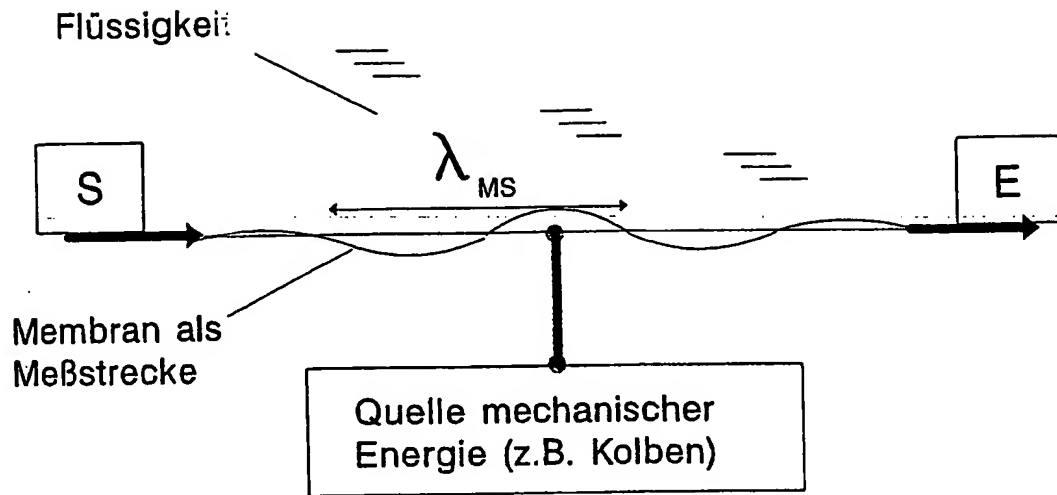
OFWVI4-3

Figur 4-4:



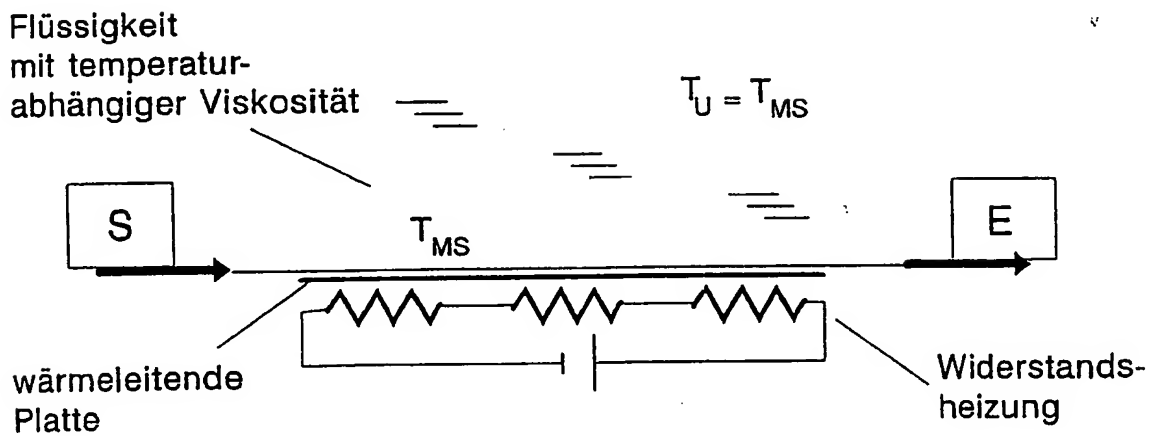
OFWVI4-4

Figur 4-5:



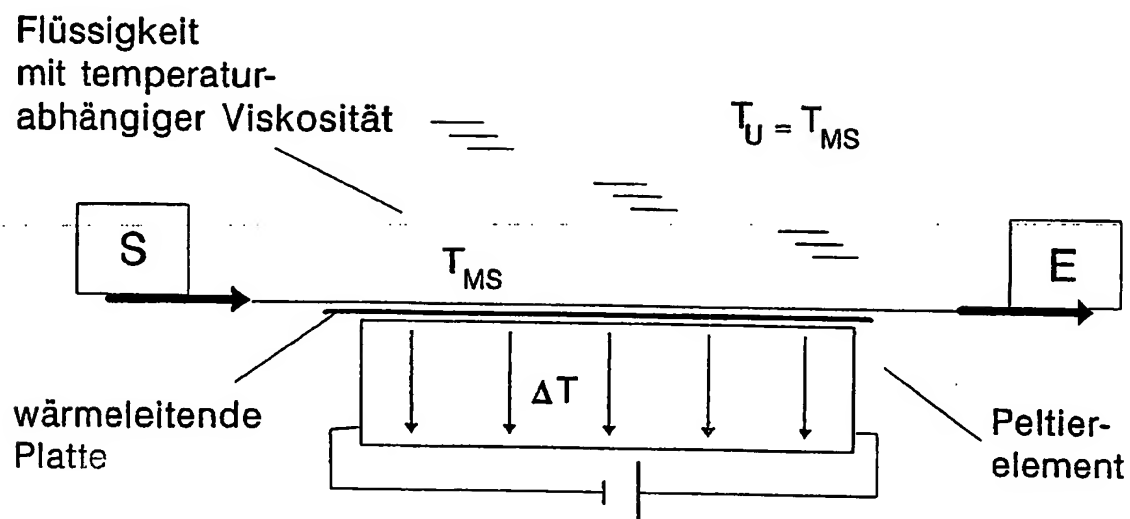
OFWVI4-5

Figur 4-6:

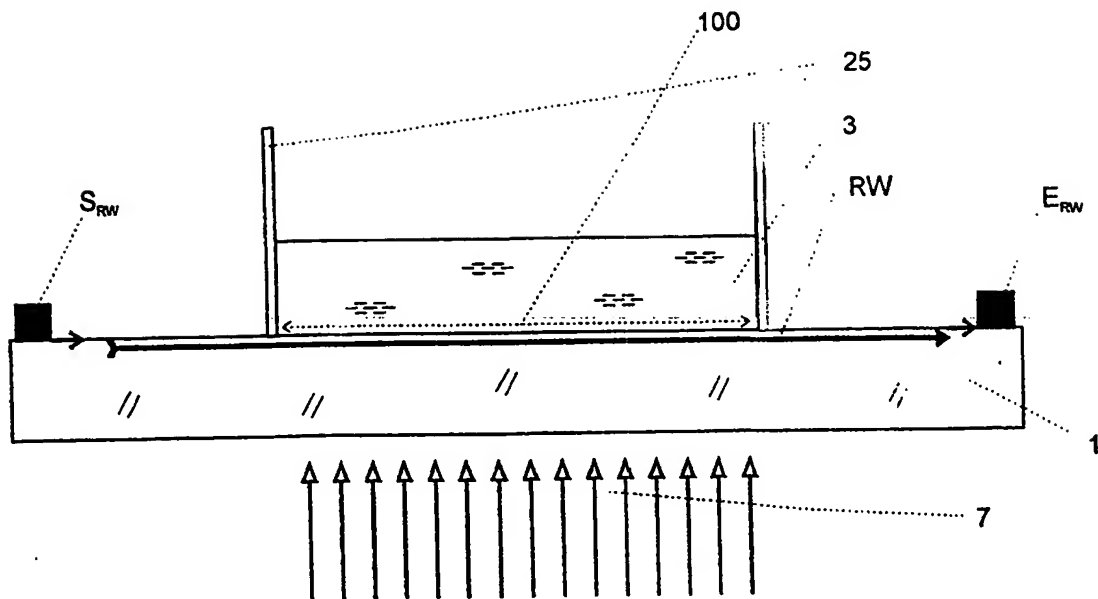


OFWVI4-6

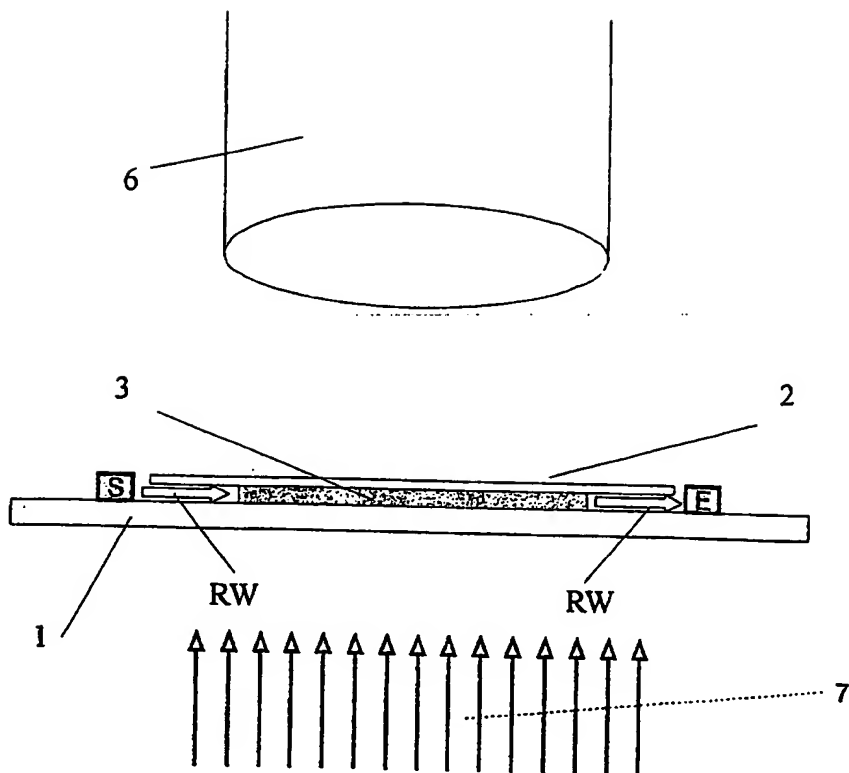
Figur 4-7:



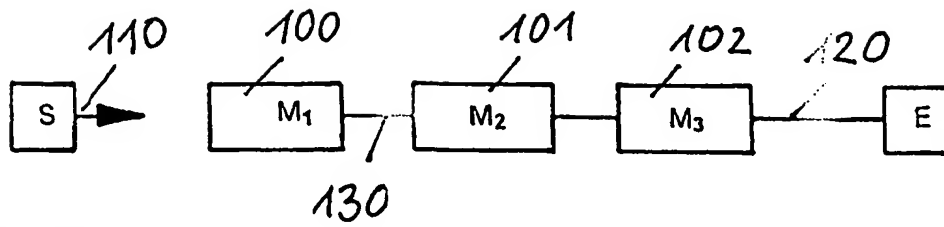
OFWVI4-7



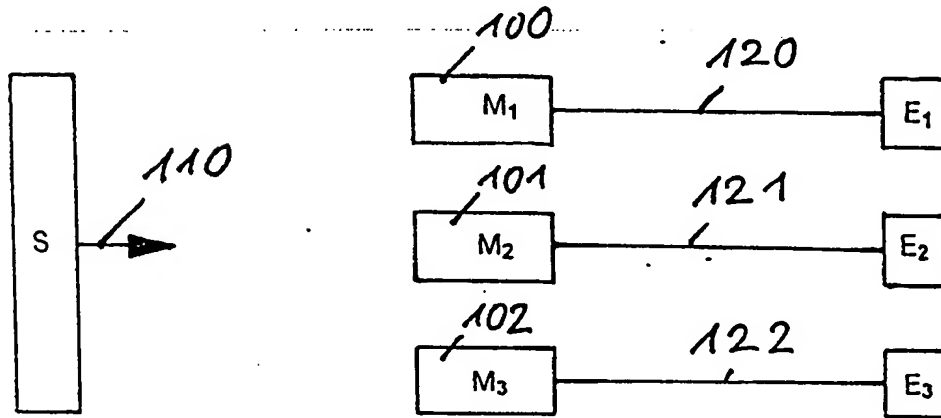
Figur 4-8



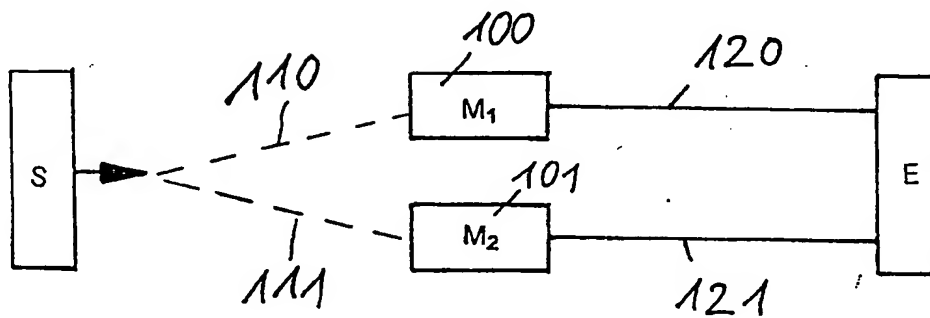
Figur 4-9



Figur 5.1a

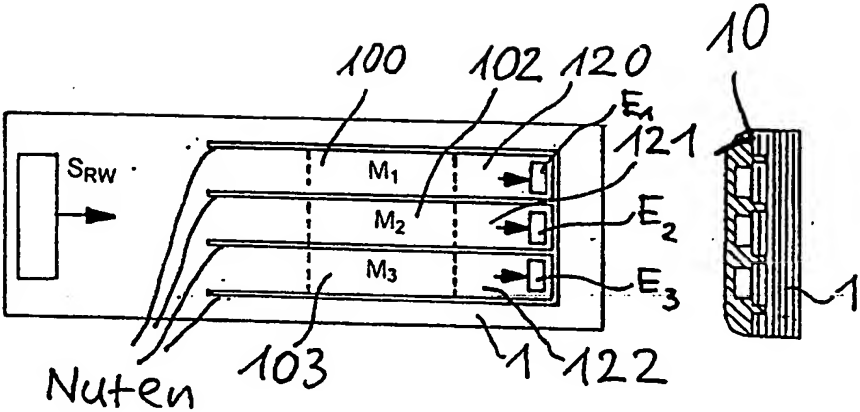


Figur 5.1b

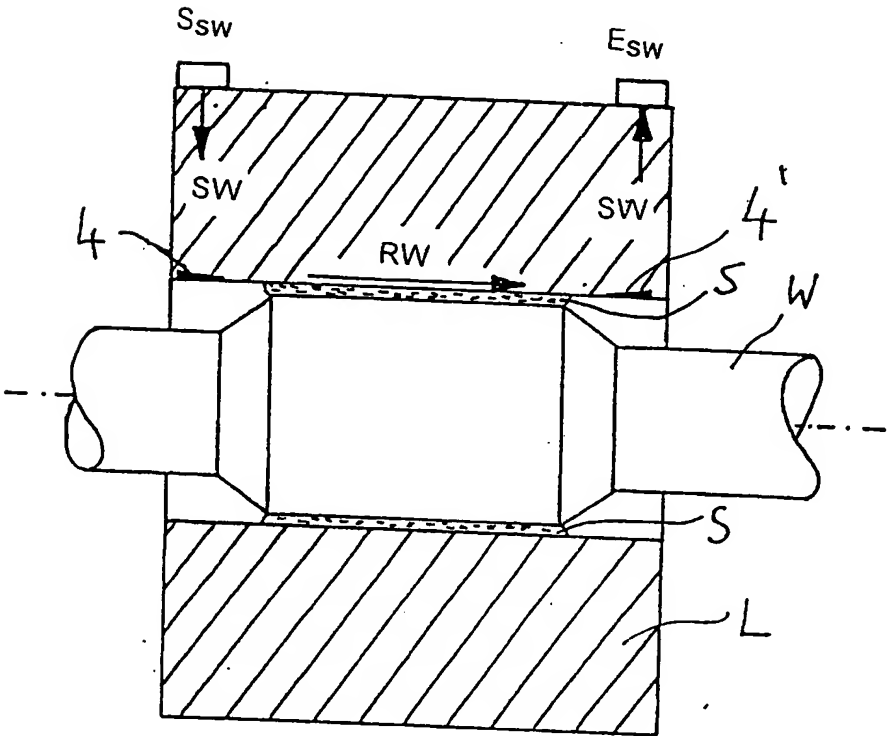


Figur 5.1c



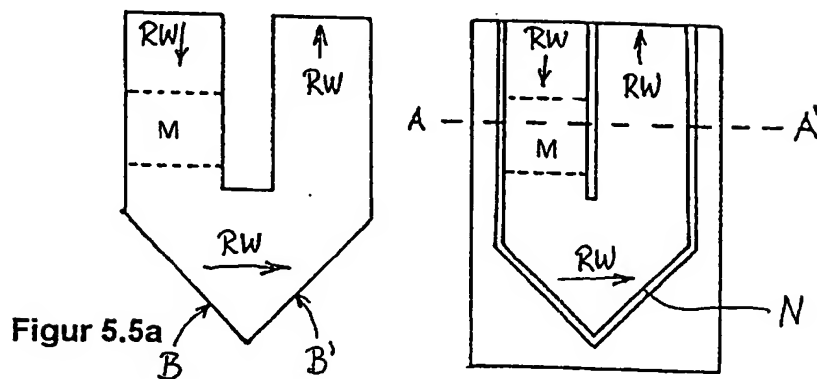
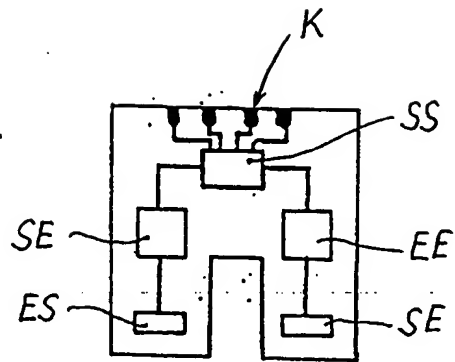


Figur 5.2a



Figur 5.2b

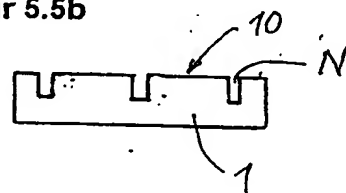
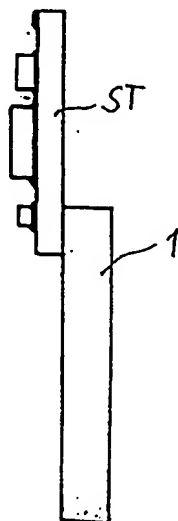




Figur 5.5a

Figur 5.5b

Figur 5.5c



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**